



LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Lahti University of Applied Sciences

MONIKERROSKALVON KIERRÄTYS PUUMUOVIKOMPOSIITISSA

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Muovitekniikan koulutusohjelma
Opinnäytetyö
Kevät 2012
Virva Hirvelä

Lahden ammattikorkeakoulu
Muovitekniikan koulutusohjelma

HIRVELÄ, VIRVA: Monikerroskalvon kierrätys puumuovikomposiitissa

Muovitekniikan opinnäytetyö, 49 sivua, 17 liitesivua

Kevät 2012

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyössä tutkittiin PE/PA-monikerroskalvojätteen käytettävyyttä puumuovikomposiitissa. Työssä valmistettiin komposiittia monikerroskalvosta ja paperista. Monikerroskalvo toimi komposiitissa matriisimuovina. Tavoitteena oli löytää muuhun uusiokäyttöön kelpaamattomalle monikerroskalvolle kierrätysmenetelmä.

Työn teoriaosa jakautuu kahteen osioon. Ensimmäisessä osassa käsitellään yleisesti monikerroskalvoja, niiden valmistusmenetelmiä, rakenteita ja kierrätettävyyttä. Toisessa osassa keskitytään kestumuoveja sisältäviin puumuovikomposiitteihin. Osassa käydään läpi käytettäviä materiaaleja, puumuovikomposiittien ominaisuuksia, valmistusta ja käyttömahdollisuuksia. Myös kierrätysmuovien käytöstä puumuovikomposiiteissa on oma lukunsa.

Tutkimusosassa kerrotaan koemateriaalien valmistuksesta sekä esitetään niille tehtyjen tutkimusten tuloksia. Yksi koemateriaaleista valmistettiin pelkästä monikerroskalvosta ja kolme muuta olivat puumuovikomposiitteja. Mekaanisia ominaisuuksia tutkittiin taivutuskokeilla, Charpy-iskukokeilla ja Shore-kovuusmittauksilla. Koemateriaaleista määritettiin tiheys ja termisiä ominaisuuksia tutkittiin DSC:lla. Rakennetta analysoitiin SEM-mikroskooppikuvista.

Pelkästä monikerroskalvosta valmistettu materiaali osoittautui sitkeäksi sekä taivutus- että iskukokeissa. Puumuovikomposiitit olivat kovia ja jäykkiä. Taivutuskokeissa ne kestivät hyvin jännitystä, mutta eivät taipuneet. Kaikilla koemateriaaleilla oli hyvin pieni sulaindeksi. Tulosten perusteella PE/PA-kalvojätteen kierrättäminen puumuovikomposiitissa on mahdollista.

Avainsanat: monikerroskalvo, puumuovikomposiitti, uusiokäyttö

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Plastics Engineering

HIRVELÄ, VIRVA: Recycling of multilayer film in wood plastic composite

Bachelor's Thesis in Plastics Engineering, 49 pages, 17 appendices

Spring 2012

ABSTRACT

The purpose of this thesis was to examine if multilayer film waste can be used as matrix in wood plastic composite (WPC). In this study wood plastic composite was made of paper and multilayer film manufactured of polyamide and polyethylene. The main objective was to discover a way to recycle a multilayer film, which currently cannot be reused as raw material.

The theoretical part of this study is divided to two parts. The first part focuses on multilayer films in general and ways to manufacture them and recycle these materials. There are also some examples of multilayer film structures. The second part is about wood plastic composites. This part explains the materials used in composites, their properties and manufacturing. Uses of WPCs in different applications are investigated. There is also a chapter about using recycled plastics in these composites.

The practical part deals with manufacturing the test materials. The test results are in this part. One of the test materials was made of PE/PA film only and three others were different composite materials. Mechanical properties of these test materials were studied by flexural tests. Impact strengths were discovered by Charpy impact tests and surface hardness by Shore durometer. Density and some thermal properties were also studied. The structures of the test materials could be analysed in SEM pictures.

Test material including only PE/PA film was tough in both impact and flexural tests. WPCs were hard and rigid. They withheld tension well but were not flexible. All four test materials had very low melt flow rates. According to the results, it is possible to recycle PE/PA film waste in wood plastics composite.

Key words: multilayer film, wood plastic composite, reuse

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	MONIKERROSKALVOT	3
2.1	Monikerroskalvojen valmistusmenetelmät	3
2.1.1	Ekstruusio	3
2.1.2	Kalvonpuhallus	4
2.1.3	Laminointi	5
2.2	Monikerroskalvojen käyttö	5
2.2.1	Erilaisia monikerroskalvoja	6
2.2.2	Lääke- ja lääketarvikepakkauskalvot	6
2.2.3	Elintarvikepakkauskalvot	7
2.2.4	Muita monikerroskalvoja	8
2.3	PE/PA-kalvot	9
2.4	Monikerroskalvojen kierrätys	9
3	PUUMUOVIKOMPOSIITIT	12
3.1	Puukuitu/kestomuovikomposiitit	13
3.1.1	Materiaalit	13
3.1.2	Puumuovikomposiitin valmistus	13
3.1.3	Puumuovikomposiitin ominaisuuksia	15
3.2	Kierrätysmuovin käyttö puumuovikomposiitissa	16
3.3	Puumuovikomposiittien käyttömahdollisuuksia	17
4	TUTKIMUKSET	19
4.1	Sulaindeksi	22
4.2	Iskukoe	23
4.2.1	Periaate	23
4.2.2	Tulokset	24
4.3	Differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria (DSC)	26
4.3.1	Periaate	26
4.3.2	Tulokset	27
4.4	Ominaispainomittaus	28
4.5	Kovuusmittaus	29
4.5.1	Periaate	29
4.5.2	Tulokset	30
4.6	Taivutuskoe	31

4.6.1	Periaate	31
4.6.2	Tulokset	32
4.7	Mikroskopia	37
4.7.1	Periaate	37
4.7.2	Tulokset	38
5	YHTEENVETO	43
	LÄHTEET	46
	LIITTEET	49

SANASTO

ABS	akryylnitriilibutadieenistyreeni
DSC	differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria
EVA	eteeni/vinyyliasetaatti
EVOH	eteeni/vinyylialkoholi
ION	ionomeeri
MAPP	maleiinihappoanhydridioksastettu polypropeeni
OPET	orientoitu polyeteenitereftalaatti
OPP	orientoitu polypropeeni
PA	polyamidi
PA-BO	biaksiaalisesti orientoitu polyamidi
PE	polyeteeni
PE-HD	korkeatiheyksinen polyeteeni
PE-LD	matalatiheyksinen polyeteeni
PE-LLD	lineaarinen matalatiheyksinen polyeteeni
PE-ULD	ultralineaarinen matalatiheyksinen polyeteeni
PET	polyeteenitereftalaatti
PET-BO	biaksiaalisesti orientoitu polyeteenitereftalaatti
PLA	polymaitohappo
PP	polypropeeni
PP-BO	biaksiaalisesti orientoitu polypropeeni
PS	polystyreeni
PVDC	polyvinyylidieenikloridi
PVC	polyvinyliklorodi

barrier	estävä tai suojaava vaikutus tiettyä ainetta vastaan
tie	monikerroskalvoissa polymeerejä yhdistävä kerros

1 JOHDANTO

Muoveja valmistetaan ja käytetään maailmassa koko ajan kasvavaa vauhtia. Muoveja on valittavissa jokaiseen käyttökohteeseen, ja niillä on loistavia ominaisuuksia. Ne ovat kevyitä, erittäin monipuolisesti muotoiltavia ja usein edullisia verrattuna vaihtoehtoihin materiaaleihin. Muovien kierrätys ei kuitenkaan ole samalla tasolla valmistuksen ja käytön kanssa. Kaikessa kulutuksessa on pyrittävä ekologiseen kestävyYTEEN. Tällä hetkellä muoveja ei käytetä kestävästi. Maailmassa käytetyistä muovituotteista valtaosa päättyy kaatopaikoille ja ympäristöön sellaisenaan.

Suurin osa valmistetusta muovista käytetään pakkauksiin tai muihin tuotteisiin, joiden elinkaari on hyvin lyhyt. Tällaiset tuotteet hävitetään vuoden kuluessa niiden valmistamisesta. (Hopewell, Dvorak & Kosior 2008, 2115.) Juuri näiden tuotteiden ja niihin käytettävien muovien kierrätys olisi tärkeää jätemäärien vähentämiseksi.

Monikerroskalvoista valmistetaan eniten juuri tällaisia lyhytikäisiä pakkauksia. Monikerroskalvojätettä syntyy kuitenkin jo ennen kuin se on pakkauksen muodossa. Kalvonvalmistuksessa on tyypillistä, että tuotannossa syntyy suurehkoja määriä leikkuujätettä ja laadunvalvonnassa hylättyä materiaalia. Useaa muovia sisältävän rakenteen vuoksi kierrättäminen on hankalaa, koska sekoittuneista materiaaleista ei enää voida valmistaa vastaavaa kalvoa yksinkertaisin keinoin.

Sellaisille muoviteollisuuden sivuvirroille, joiden kierrättäminen raaka-aineena tehtaan sisällä uudeksi tuotteeksi ei onnistu, etsitään korvaavia kierrätysmahdollisuuksia. Teollisuuden sivuvirtana syntyvää monikerroskalvojätettä voidaan ajatella puhtaana raaka-aineena. Sitä ei ole käytetty vielä mihinkään tuotteeseen, vaikka se on jo käytännössä jätettä. Myös puumuovikomposiittien sisältämä puukuitu on usein sahajauhoa tms. puutuotteen valmistuksessa ylimääräiseksi jäävää materiaalia.

Tavoitteena oli valmistaa kahdesta kierrätysmateriaalista uusi raaka-aine ja tutkia PE/PA-monikerroskalvon kierrätettävyyttä. Puukuituna käytettyä paperia kierrätetään puumuovikomposiitissa, mutta työssä käytettyä monikerroskalvojäätettä ei tällä hetkellä kierrätetä. Kun puumuovikomposiitin matriisimuovina käytetään neitseellisen raaka-aineen sijasta monikerroskalvojäätettä, tulokseksi saadaan täysin kierrätysmateriaaleista valmistettu, ekologinen komposiitti.

2 MONIKERROSKALVOT

Erilaisia materiaalikerroksia sisältäviä kalvoja kutsutaan monikerroskalvoiksi. Monikerroskalvoja valmistetaan, jotta voidaan käyttää hyväksi eri polymeerien parhaat ominaisuudet yhdessä kalvossa (Seppälä 2005, 275). Eteenivinyylialkoholi (EVOH) estää hapen pääsyä kalvon läpi. Eteeni/vinyyliasetaatti (EVA) tuo monikerroskalvoon joustavuutta ja saumautuu helposti. Polyamidit toimivat paitsi happibarrierina myös lujittavat kalvoa. (Packaging Films 2011.) Hyödyntämällä näitä ominaisuuksia saadaan käyttökohteeseen sopivin yhdistelmä. Joissain tapauksissa pystytään alentamaan kalvon valmistuskustannuksia käyttämällä kalleimpia polymeerejä vain tuotteen kannalta kriittisissä kerroksissa. (Seppälä 2005, 275.) Vaikka monikerroskalvoissa käytetään useita polymeerejä, niistä voidaan usein tehdä ohuempia kuin yksikerroskalvoista ominaisuuksia heikentämättä. Ohuempi kalvo säästää raaka-aineita ja kustannuksia.

2.1 Monikerroskalvojen valmistusmenetelmät

Monikerroskalvoja voidaan valmistaa kolmella tavalla. Ekstrudoitu ja puhallettu kalvo eroavat laminoidusta kalvosta siten, että näillä menetelmillä saadaan valmistettua useita kerroksia sisältävä kalvo yhdessä työvaiheessa. Laminoinnissa etukäteen valmistetut kalvot liimataan yhteen.

2.1.1 Ekstruusio

Ekstruusio on yleisin kestopuovien valmistusmenetelmä. Menetelmällä voidaan valmistaa erilaisia jatkuvia tuotteita. Näitä ovat kalvojen lisäksi erilaiset putket, letkut, kuidut ja profiilit. (Seppälä 2005, 261.) Yleisimpiä raaka-aineita ekstruusiossa ovat PVC, PE ja PP (Seppälä 2005, 262).

Ekstruusiossa pehmeäksi kuumennettu polymeeri sekoitetaan homogeeniseksi ja puristetaan tiiviiksi massaksi ekstruuderissa. Lopputuotteen muoto määräytyy kun massa puristetaan halutun muotoisen suulakkeen läpi. (Seppälä 2005, 261.) Kal-

vonvalmistuksessa suuttimesta tullutta tasokalvoa voidaan venyttää ja ohentaa käyttämällä esim. lämpötilaltaan ja pyörimisnopeudeltaan erilaisia teloja. Venyttäminen orientoi polymeeriketjut samansuuntaisiksi ja vahvistaa kalvon rakennetta. (Muoviteollisuus ry 2012.)

Monikerroskalvot valmistetaan käyttämällä useita rinnakkaisia ekstrudereita. Tätä valmistustapaa kutsutaan koekstruusioksi. Koekstruusio on monikerroskalvojen valmistustavoista kustannustehokkain. Verrattuna muihin kalvoihin koekstruusiokalvolla on hyvä lävistyksenkestävyys, ja kerrosrakenne vähentää repeämien leviämistä kalvossa. (Packaging Films 2011.) Koekstruusiossa vähintään kaksi muovivirtaa liitetään toisiinsa sekoittamatta materiaaleja. Jokainen materiaali plastisoidaan erikseen ja johdetaan suuttimeen. Samaan suuttimeen voidaan liittää jopa kymmenen ekstruderia. Kerrokset liitetään toisiinsa suuttimessa tai joissain sovelluksissa esimerkiksi päällimmäinen kerros voidaan ajaa toisen kerroksen päälle ensimmäisen suuttimen jälkeen. (Seppälä 2005, 275.) Yksittäisen ekstruderin tuottama massa on mahdollista myös jakaa suuttimessa; esimerkiksi kolmella ekstruderilla (A, B ja C) voidaan valmistaa kolmikerroskalvon (A/ B /C) lisäksi viisikerroskalvoa (A/C/B/C/A) jakamalla pinta- ja välikerrosten massavirrat.

2.1.2 Kalvonpuhallus

Kalvonpuhallus on nimensä mukaisesti erityisesti kalvonvalmistukseen kehitetty menetelmä. Puhallusmenetelmällä valmistetaan PE-, PP-, PVC- ja vaahdotettavaa PS-kalvoa (Seppälä 2005, 297). Puhalluskalvon etu verrattuna tasokalvoon on sen muoto; tarvittaessa letkusta saadaan helposti pussimainen lopputuote. Kalvoon voidaan tehdä sivutaitteet valmistusvaiheessa. Leikkaamalla puhalluskalvon sivut auki saadaan yksinkertainen kalvo. (Seppälä 2005, 301.)

Kalvonpuhallus perustuu ekstruusioon. Tässä menetelmässä ekstruderin suutin on ympyränmuotoinen. Suutin on yleensä 90°:n kulmassa ekstruderiin nähden. Ympyränmuotoiseen aihioon puhalletaan ilmaa, jolloin muodostuu puhalluskupla. Puhallussuhteella säädetään kalvon paksuutta ja orientointia. Monikerrospuhalluskalvoa valmistetaan samalla periaatteella kuin monikerrostasokalvoakin. Jokai-

nen raaka-aine sekoitetaan omassa ekstruuderissaan ja yhdistetään sitten suuttimessa. (Seppälä 2005, 297.)

2.1.3 Laminointi

Laminointi mahdollistaa sellaisten materiaalien yhdistämisen, joita ei voida valmistaa koeksrtuusiolla. Esimerkiksi alumiinifolio ja polyeteenikalvo ovat tällainen yhdistelmä. Laminoimalla voidaan yhdistää erilaisia muovikalvoja sekä muovia ja paperia. Materiaalikerrokset yhdistetään toisiinsa liimaamalla. Tätä valmistustapaa kutsutaan liimalaminoinniksi. Toinen vaihtoehto on ekstruusiolaminointi. Siinä liima-aine korvataan sulalla polymeerillä (usein PE-LD), joka ekstrudoidaan kalvokerrosten väliin. Laminoinnissa pakkauskalvon kuviointi voidaan painaa kalvon sisäpinnalle ennen niiden yhdistämistä jolloin painatus jää kalvokerrosten väliin. Näin saadaan kestävä ja kaunis painatus. (Butler & Morris 2009, 207.)

2.2 Monikerroskalvojen käyttö

Ylivoimaisesti suurin osa maailmassa valmistettavista monikerroskalvoista käytetään erilaisiin pakkauksiin. Jokaisella pakkauksella on omat erityisvaatimuksensa, jotka määrittelevät kerrosten materiaalit ja kalvojen valmistusmenetelmät. Monikerroskalvoja käytetään korkean teknologian ruokapakkauksista aina vahvoihin kuljetussäkkeihin. (Butler & Morris 2009, 205.) Koko kalvotekniikasta monikerroskalvojen osuus on 17 prosenttia (Tartakowski 2010, 167). Biaksiaalisesti orientoituja kalvoja valmistettiin maailmanlaajuisesti vuonna 2008 yli 12 miljoonaa tonnia. Näistä 66 prosenttia oli biaksiaalisesti orientoitua polypropeenaa (PP-BO) ja 25 prosenttia biaksiaalisesti orientoitua polyeteenitereftalaattia (PET-BO). (Breil 2009, 236.)

2.2.1 Erilaisia monikerroskalvoja

Monikerroskalvoilta vaaditaan käyttökohteen mukaisia ominaisuuksia. Polymeerien valinnalla voidaan vaikuttaa käyttökohteen kannalta kriittisiin ominaisuuksiin. Näitä ovat ainakin kalvon barrierominaisuudet ja haluttu läpäisevyys. Toivottuja ominaisuuksia ovat mahdollisimman suuret veto-, isku- ja repäisylujuus. Usein tarvitaan myös hyvää lämmön-, kulumisen ja kemikaalinkestoja. Pakkauksissa käytettävillä kalvoilla on tiettyjä erityisvaatimuksia. Elintarvikepakkaukseen käytettävän kalvon tulee olla paitsi elintarvikekelpoinen myös hajuton ja mauton. Jotta saataisiin toimiva pakkaus, kalvon tulee olla helposti ja nopeasti saumautuvaa. Saumojen pitää olla kestäviä mutta toisaalta helposti avattavia ja usein uudelleensujettavia. (Butler & Morris 2009, 205–206.) Yleisesti monikerroskalvoissa käytettyjä muoveja ovat polyamidit, polyeteeni, polypropeeni, polystyreeni, polyeteenitereftalaatti, PVC, ABS, polykarbonaatti, EVOH ja PLA (Packaging Films 2011). Useimmat monikerroskalvot sisältävät polyeteeniä (PE) sen edullisen hinnan ja hyvän saatavuuden takia. Seuraavissa luvuissa esitetyt kalvorakenteet ovat esimerkkejä: jopa samaan käyttökohteeseen voi olla valmistajasta ja kalvon ostajasta riippuen useita vaihtoehtoja.

2.2.2 Lääke- ja lääketarvikepakkaukskalvot

Medikaalipakkauksiin käytetyillä kalvoilla on tarkasti määritettyjä vaatimuksia. Valmiin pakkauksen on oltava steriili ja estettävä bakteerien pääsy pakkaukseen (Butler & Morris 2009, 216). Koska pakkaus voi sisältää esimerkiksi neuloja tai saksia, sen lävistystenkestävyys on oltava hyvä (Wipak Oy, 2011). Medikaalipakkaus on usein litteä pussi, jonka toinen sivu on kangasta ja toinen muotoutuvaa monikerroskalvoa. Pakkauksen on avauduttava helposti sivusaumat repimällä. (Butler & Morris 2009, 216.)

Aikaisemmin medikaalikalvot ovat olleet kolmikerroksista eteenivinyylin ja ionomeerikalvon yhdistelmää. Paksuimmissa kalvoissa on käytetty kuusikerrosrakennetta. Nykyisin ionomeerikalvo on usein korvattu polyamidilla (PA) ja kerroksia on vähintään viisi. Toisenlaisia medikaalipakkauksia edustavat kondomien ja

kosteuspyyhkeiden pakkaukset. Tyypillinen kosteuspyyhkepakkaukseen käytettävä kalvo on laminoitu niin että keskimmäisenä kerroksena on alumiini: PET-O/painatus/PE-LD/Al/ION. Ionomeerikalvoa käytetään saumautuvana kalvona sen kemiallisen taivutussäröilyn kestävyys takia. (Butler & Morris 2009, 217.)

2.2.3 Elintarvikepakkauskalvot

Elintarvikepakkauksiin käytetään lähes aina monikerroskalvoa, koska tarpeellisia säilyvyys- ja ulkonäköominaisuuksia on vaikea saavuttaa vain yhdellä polymeerillä. Kalvon rakenne voi vaihdella suurestikin pakattavan elintarvikkeen mukaan. Esimerkiksi pakastettujen elintarvikkeiden pakkauksiin käytettävät kalvot eroavat vaatimuksiltaan huomattavasti makkarapakettiin käytettävästä kalvosta.

Lihapakkauksiin käytetään kutistekalvoa, jolla on oltava mm. erinomaiset optiset ominaisuudet. Lisäksi vaaditaan sulkuominaisuudet hapen, kosteuden, hajun ja rasvan kannalta. Nämä kalvot on orientoitava, jotta kalvo saadaan kutistumaan riittävästi. Kalvossa käytetään polyvinyyliideenikloridi (PVDC)-kerrosta barrier-kerroksena ja lisäksi saumautuvaa polymeeriä. Esimerkkikalvon rakenne on PE-ULD/EVA/PVDC/EVA/PE-ULD, 40/5/10/5/40. (Butler & Morris 2009, 218.)

Lihavalmistepakkauksiin käytetään kalvoa jolla on hyvät happibARRIEROMINAI-suudet. Tuotteen tulee säilyä pakkauksessa kauemmin kuin pakatun tuoreen lihan. Kalvossa on usein barrierkerroksen lisäksi helposti painettava kerros (PET tai PA) ja polyeteenikerros tuomassa kalvoon jäykkyyttä. Tyypillinen lihavalmisteiden pakkauskalvo on rakenteeltaan PE-LLD/tie/EVOH/PA, 75/5/10/10 (Butler & Morris 2009, 218–219).

Muita erilaisia elintarvikepakkauskalvoja käytetään murolaatikoiden sisäpusseihin (PE-HD/PE-HD/EVA), sekä leipomotuotteiden (EVA/PP), perunalastujen (PP-O/met/PP-O), juustojen (PE-LLD/tie/EVOH/PET-O) ja pakasteiden (PE-LLD/EVA/PE-LLD) pakkauksiin. Metallitölkit voidaan korvata aukirevittävillä pusseilla, joissa metallikerrokseen laminoidaan PA-BO -kerros tuomaan jäykkyyttä ja PE saumautuvaksi kerrokseksi. PE-HD suojaa kosteudelta. EVA ja ionomee-

ripolymeerit ovat helposti saumautuvia alhaisissakin lämpötiloissa saaden aikaan kestäväen muuta helposti avautuvan sauman. Barrierpolymeerit PA ja EVOH suojaavat makua siihen vaikuttavilta ulkoisilta tekijöiltä. Metallikerros tarjoaa erinomaisten barrierominaisuuksien lisäksi suojaa valolta ja UV-säteilyltä. (Butler & Morris 2009, 218–225.)

2.2.4 Muita monikerroskalvoja

Käärekalvoja käytetään laatikoiden tms. sitomiseen ja suojaamiseen kuljetuksessa. Käärekalvo venyy 100–300 %, kun se kierretään lavan tai rullakon ympärille, ja takertuu itseensä pitäen lastatut tavarat tiukasti kiinni toisissaan. Kalvo koostuu suurimmaksi osaksi PE-LLD:stä. Pintakerrokseen lisätään polymeeriä, joka on luontaisesti hyvin tarrautuvaa (esim. PE-ULD/PE-LLD/PE-ULD). (Butler & Morris 2009, 225–226.)

Monikerroskalvoa käytetään myös paksuihin säkkeihin, joissa kuljetetaan esimerkiksi hartsia, suolaa tai lemmikinruokaa. Säkit voivat painaa täytettynä 18 kiloa, joten kalvon on oltava kestävä. Kalvossa käytetään PE-LLD:ä, PE-LD:ä vähentämään virumista, PE-HD:ä ja PP:a tuomaan jäykkyyttä ja lämpötilan kestoa sekä saumautuvan kerroksen. (Butler & Morris 2009, 226.)

Polyeteenipohjaisista monikerroskalvoista valmistetaan muovipusseja ja kauppakasseja. Näissä tuotteissa monikerroskalvo mahdollistaa ohuemman, mutta yhtä kestäväen rakenteen. Helposti saumautuva kerros nopeuttaa muovipussin valmistusta. Kolmikerrosrakenteista kalvoa käytettäessä muovipussin keskimäinen kerros voi olla vaikkapa kierrätysmateriaalia. (Butler & Morris 2009, 226.)

2.3 PE/PA-kalvot

Kaikista monikerroskalvoista eniten valmistetaan polyeteenia ja polyamidia sisältävää kalvoa (Tartakowski 2010, 167). Polyeteeni on hinnaltaan edullinen valta-muovi, joka saumautuu hyvin. Polyeteenin kemiallinen kestävyys on erinomainen. (Muoke 2011.) Polyamidi on tekninen muovi, jolla on useisiin käyttökohteisiin riittävät barrierominaisuudet. Näiden kahden yhdistelmä on yksinkertainen barrierominaisuuksiltaan hyvä kalvo. PE/PA-kalvoja käytetään kaikenlaisissa pakkauksissa (Butler & Morris 2009; Wipak Oy 2011).

Polyeteeni- ja polyamidikerrokset eivät kiinnity toisiinsa ilman erillistä kiinninainetta. Kiinnittävä aine on eteenikopolymeeria, jossa on polyamidin kanssa reagoivia happo-, tai anhydridiryhmiä (Butler & Morris 2009, 215). Medikaalipakkauksessa käytettävässä viisikerroskalvossa on siis kaksi kerrosta kiinnittävää polymeeriä: PE-LLD/tie/PA/tie/PE-LLD, 40/5/10/5 (Butler & Morris 2009, 217).

2.4 Monikerroskalvojen kierrätys

Muovien kierrättämiseksi on olemassa muutamia vaihtoehtoja: uudelleenkäyttö, materiaalikierrätys, kemiallinen kierrätys tai energiahyötykäyttö (Goodship 2007, 8). Uudelleenkäyttäminen tarkoittaa kirjaimellisesti muovituotteen käyttämistä uudelleen, esimerkkinä palautuspullot tai vähittäiskaupassa elintarvikkeiden kuljetukseen käytettävät lavat ja laatikot. Uudelleen käytettäviä muovipakkauksia on myös esimerkiksi joissain pesuaineissa ja kosmetiikkatuotteissa. Nämä myydään ensimmäisen kerran varsinaisessa pakkauksessaan, joka voi sisältää vaikkapa peilin tai suihkepullon suuttimen. Ostessaan tuotetta toisen kerran asiakas voi valita yksinkertaisemman refill-pakkauksen, ja täyttää varsinaisen pakkauksen uudelleen. Materiaalikierrätyksessä kierrätettävä muovituote rouhitetaan, sulatetaan ja käytetään uuden tuotteen raaka-aineena (Goodship 2007, 8). Käytettävän muovin on oltava kestopuovia, jotta se voidaan sulattaa uudelleen. Muovituotteet, jotka sisältävät vain yhtä polymeeriä, ovat kierrätettävissä materiaalina. (Tartakowski 2010, 167.)

Kemiallisessa kierrätyksessä tuote hajotetaan takaisin polymeerin öljy/hiilivetykomponenteiksi, jotka käytetään uuden polymeerin tuotannossa. Kemiallisen kierrätyksen toteuttamiseen on useita menetelmiä, mutta toistaiseksi sekä taloudellisesti kannattavaa ja toimivaa menetelmää Suomen olosuhteisiin ei ole löydetty (Helsingin yliopisto 2005). Kemiallinen kierrätys vaatisi suuremmat määrät kierrätettävää materiaalia.

Energiahyötykäytössä muovijäte poltetaan polttolaitoksessa energiaksi (Goodship 2007, 8). Muovin polttamista ei voi ehkä ajatella varsinaisena kierrätyksenä, mutta se on monissa tapauksissa ainoa kannattava vaihtoehto. Muovien lämpöarvo on erinomainen, ja niiden polttaminen vähentää kaatopaikoille kertyvää jätettä sekä fossiilisten polttoaineiden käyttötarvetta. Teollisessa polttolaitoksessa muovit palavat melko puhtaasti, mutta (kuten kaikessa palamisessa) tuottavat hiilidioksidipäästöjä. (Helsingin yliopisto 2005)

Muovijäte on lähes aina lajiteltava materiaalin mukaan ennen kierrättämistä (Goodship 2007, 45). Kierrättämien on taloudellisesti kannattavaa vain, jos samaa polymeeriä sisältävää jätettä on tarpeeksi. Kierrätyksessä pitää huomioida materiaalin puhtaus ja sen mahdollisesti sisältämät lisäaineet. Periaatteessa kestumuovista valmistettu tuote voidaan kierrättää uuden samanlaisen tai samasta kestumuovista valmistettavan tuotteen raaka-aineeksi. (Tartakowski 2010, 167.) Elintarvike- ja lääketeollisuus eivät voi käyttää kierrätettyä muovia hygieniasyistä. Muovien ominaisuudet myös heikkenevät jokaisella kierrätyskerralla, joten muovia ei voida kierrättää loputtomiin. (Helsingin yliopisto 2005)

Suurin osa monikerroskalvoista käytetään elintarvikepakkausten valmistukseen. Nämä pakkaukset päätyvät yleensä roskeen yhden käyttökerran jälkeen (Tartakowski 2010, 167). Käytettyjä pakkauksia ei kierrätetä teollisessa mittakaavassa, koska pakkaus likaantuu käytössä ja kuluttajilta kerätyistä käytetyistä pakkauksista voi olla vaikea erottaa samoja raaka-aineita sisältävät materiaalit. Erilaisia kalvoja ei voi yleensä erottaa toisistaan ulkonäön perusteella, mikä vaikeuttaa lajittelua (Tartakowski 2010, 168). Monikerroskalvosta valmistetuissa pakkauksissa on tunnisteenä muovien kierrätysmerkki 07 (muut muovit ja sekoitemateriaalit), joka kertoo sen sisältävän useita polymeerejä (Kuluttajavirasto 2011). Kierrätystä var-

ten materiaali tulisi kuitenkin tunnistaa tarkemmin, esim PA/PE-, PS/PE- tai PET/PE-kalvot (Tartakowski 2010, 168). Suomessa pakkausjäte käytetään hyödyksi kierrättämällä materiaalina (juomapullot) tai polttamalla energiaksi (Pakkausalalan ympäristörekisteri Oy 2011).

Useita eri polymeerejä sisältävän monikerroskalvon kierrättäminen materiaalina on haasteellista. Kerrokset pitäisi saada irrotettua toisistaan, jotta niistä voitaisiin valmistaa uusiomateriaalia. Ohuiden kerrosten irrottaminen toisistaan voi olla vaikeaa, joka tapauksessa se ei ole kustannustehokasta. Monikerroskalvosta sellaisenaan voi tehdä kierrätysmateriaalia, mutta sitä ei voi käyttää samanlaisen kalvon valmistukseen, koska polymeerit ovat kokonaan tai osittain sekoittuneet. Tällaisten uusiomateriaalien käytöstä on vain vähän tutkimusmateriaalia. Käyttökelpoisen muovituotteen valmistus vaatii tietoa prosessointilämpötiloista ja raaka-aineen muista ominaisuuksista (Tartakowski 2010, 168). Monikerroskalvojäte pyritään käyttämään hyödyksi polttamalla se energiaksi, mutta osa jätteestä päätyy silti kaatopaikalle. Metallia sisältävät kalvot (esimerkiksi perunalastupussit) ovat seka-jätettä (Jätelaitosyhdistys 2011).

Muoviteollisuudessa kierrätetään yleisesti normaalissa tuotannossa syntyvät sivuvirrat. Sivuvirtoja ovat esimerkiksi laadunvalvonnassa hylätyt tuotteet, kalvoteknolisuudessa leikkuujäte tai ruiskuvalussa kappaleesta irrotettavat syöttötapit. Nämä kierrätetään materiaalina ja lisätään uuden raaka-aineen sekaan. Tehtaan sisäinen kierrätys on taloudellista: uutta raaka-ainetta kuluu vähemmän ja jätteen määrä vähenee. (Goodship 2007, 46.) Myös monikerroskalvojätettä syntyy tuotannollisista syistä jo kalvoa valmistavassa tehtaassa. Kuten edellä on mainittu, monikerroskalvojen rakenteen vuoksi sivuvirtojen kierrätys tehtaassa ei onnistu. Teollisuuden sivuvirrat luovat kuitenkin jo käytettyjä pakkauksia paremmat edellytykset kierrätykseen. Materiaali on puhdasta ja monikerroskalvojen sisältämät polymeerit ovat lisäaineita myöten tiedossa.

3 PUUMUOVIKOMPOSIITIT

Puumuovikomposiiteissa yhdistetään muovien erinomainen muunneltavuus puun luonnollisuuteen. Tuloksena on uusi materiaali, joka pyrkii hyödyntämään molempien materiaalien ominaisuuksia. Kun puukuitulujitteisen muovikomposiitin kehityksessä otetaan huomioon molempien aineiden mahdollisuudet, saadaan toimiva kokonaisuus, jonka käyttäytyminen on paremmin ennustettavissa. (Koto & Tiisala 2004, 2.)

Erilaisia puumuovikomposiitteja on paljon. Perinteinen jääkiekkomaila on esimerkki yhdyntyyppisestä puumuovikomposiitista. Jääkiekkomailaan saadaan vahva rakenne liittämällä hartsilla useita ohuita puukerroksia päällekkäin. Sekoittamalla puukuitua muoviin saadaan hyvin toisentyypistä komposiittimateriaalia. Tällainen puumuovikomposiitti on puun oloista ja näköistä, mutta sen ominaisuuksia voidaan muunnella ja siitä voidaan valmistaa tuotteita samoilla valmistusmenetelmillä kuin muovista. Komposiitin ominaisuuksiin vaikuttavat valittu polymeeri ja puukuitu.

Eniten puumuovikomposiittimateriaalista valmistetaan ulkokäyttöön soveltuvaa lautta sekä rakennuselementtejä (Caulfield, Clemons, Jacobson & Rowell 2005, 6). Säänkestäville puumuovikomposiiteille on maailmanlaajuista kysyntää useastakin syystä. Ulkokäyttöön tarkoitettu puutavara saatetaan käsitellä puunkyllästysaineella, jotta siitä saataisiin säänkestävää. Monet maat ovat rajoittaneet näiden aineiden käyttöä niiden myrkyllisyyden vuoksi. (VTT 2003.) Puumuovikomposiittilautaa voidaan osittain käyttää korvaamaan sademetsien harvinaisia kovapuu-lajeja, joita käytetään ulkorakentamisessa. Vaikka puu on uusiutuva luonnonvara, liialliset hakkuut tekevät näistä puulajeista käytännössä uusiutumattomia (Cui, Lee, Noruziaan, Cheung & Tao 2008, 655).

3.1 Puukuitu/kestomuovikomposiitit

3.1.1 Materiaalit

Puukuitu/kestomuovikomposiitteihin käytetty puu on yleensä purun tai lastun muodossa (VTT 2003). Puukuidun määrä komposiitissa vaihtelee 30 ja 85 %:n välillä. Yleisin komposiiteissa käytetty polymeeri on polyeteeni, myös polypropyleniä ja PCV:a käytetään jonkin verran, muiden muovien osuus on alle 1 %. (Caulfield ym. 2005, 3.)

Perinteisesti muoviteollisuus on käyttänyt komposiittien valmistuksessa epäorgaanisia materiaaleja, kuten talkkia ja lasikuitua. Puukuitulujitteinen komposiitti ei saavuta yhtä hyviä mekaanisia ominaisuuksia kuin esimerkiksi lasikuidulla lujitettu muovi. Joissain komposiiteissa puukuitua ei käytetä lujittamaan materiaalia, vaan sitä käytetään lähinnä muovin täyteaineena.

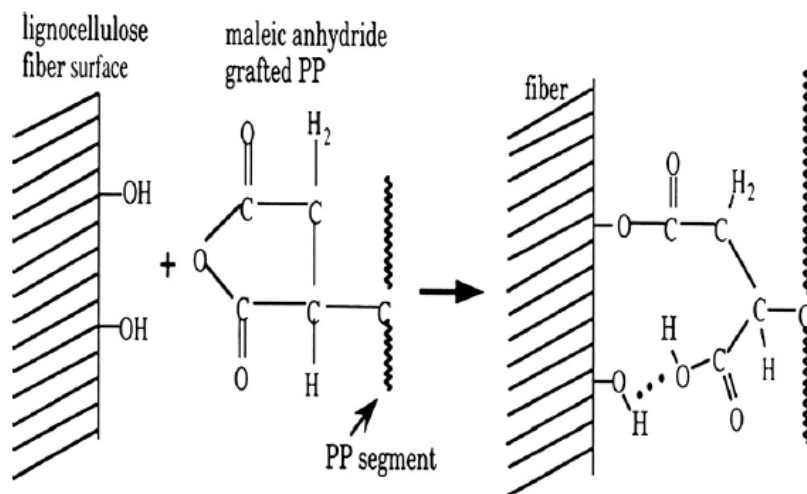
3.1.2 Puumuovikomposiitin valmistus

Puukuitukomposiitteja voidaan valmistaa samoilla laitteilla ja menetelmillä kuin perinteisiä kestopuuvituotteitakin (Koto & Tiisala 2004). Valmistusmenetelmä valitaan tuotteen mukaan kuten muoveillakin. Ylivoidmaisesti suurin osa puumuovikomposiiteista valmistetaan kuitenkin ekstruusiolla (Caulfield ym. 2005, 7).

Luonnonkuiduilla on rajallinen lämmönkestävyys, joten muovien vaatimat prosessointilämpötilat voivat olla liian korkeita puukuidulle. Puun sisältämät lignoselluloosayhdisteet hajoavat tavallisesti 200 °C ja 220 °C:n välillä. Toinen merkittävä haaste puumuovikomposiitin prosessoinnissa on puukuidun kuivaaminen. Rakentamisessa käytetty kuiva puu sisältää kosteutta jopa 5–7 %; ennen ekstruuderiin syöttämistä suositeltava kosteusprosentti on alle 1 %. Prosessoinnissa liian kostea materiaali aiheuttaa kuplia, jotka heikentävät tuotteen mekaanisia ominaisuuksia ja pinnanlaatua. (Koto & Tiisala 2004.) Ylimääräinen kosteus voidaan poistaa kaksivaiheisessa valmistusprosessissa: ensimmäisessä vaiheessa materiaalit sekoitetaan ja niistä valmistetaan granulaattia, vasta sitten tehdään varsinainen tuote.

Puukuidun kuivaaminen ennen ekstruuderiin syöttämistä voi olla vaarallista: jauhona tai pienenä puruna oleva puukuitu aiheuttaa kuivana räjähdysvaaran. (Caulfield ym. 2005, 4.) Valmistuksessa huomioitavia seikkoja ovat muovin ja puun erilaiset tiheydet, viskositeetit ja kosteus (Koto & Tiisala 2004). Puukuidun lisääminen polymeerin sekaan ja muoviteollisuuden koneisiin voi olla haasteellista. Koneissa on usein pieniä aukkoja, joista puu täytyy pakottaa läpi sen matalan irtotiheyden vuoksi. Puukuidun alhainen lämmönkesto ja suuri kosteusprosentti aiheuttavat ongelmia prosessoinnissa. (Caulfield ym. 2005, 4.)

Puumuovikomposiiteissa voidaan käyttää erilaisia lisäaineita. Puukuitu ja muovi eivät yleensä tartu toisiinsa riittävästi ilman kytKentäainetta, koska puu on hydrofiilinen ja polymeerit hydrofobisia materiaaleja. Maleiinihappoanhydridioksettua polypropeenaa (kuvio 1) käytetään yleisimmin sopeuttamaan materiaaleja toisiinsa. (Caulfield ym. 2005, 4.) KytKentäaineen käyttö parantaa huomattavasti komposiitin lujuutta (Cui ym. 2008, 656).



KUVIO 1. MAPP:n andridiryhmän ja soluseinämän hydroksiryhmän välinen reaktio. (Caulfield ym. 2005, 4)

3.1.3 Puumuovikomposiitin ominaisuuksia

Puumuovikomposiitin ominaisuudet ovat, kuten itse materiaalikin, mielenkiintoinen sekoitus kahta täysin erilaista materiaalia. Ominaisuudet riipuvat paitsi raaka-aineista, myös puun ja muovin suhteesta komposiitissa (kts. taulukko 1).

TAULUKKO 1. PP-luonnonkuitukomposiittien ominaisuuksia (Parjanen & Andersson 2009, 9)

Komposiitti	Veto-ominaisuudet				Taivutus		Izod törmäystesti		Taipumislämpötila °C
	Tiheys, g/cm ³	Lujuus, MPa	Modulus, GPa	Venymä, %	Lujuus, MPa	Modulus, GPa	Lovettu, J/m	Loveamaton, J/m	
Polypropyleeni	0,90	28,5	1,53	5,9	38,3	1,19	20,9	65,6	57
PP +40 % puujauhoa	1,05	25,4	3,87	1,9	44,2	3,03	22,2	73,0	89
PP + 40 % kovapuukuitua	1,03	28,2	4,20	2,0	47,9	3,25	26,2	91,0	100
PP + 40 % kovapuukuitua + 3 % kytkentäainetta	1,03	52,3	4,23	3,2	72,4	3,22	21,6	162,0	105

Puu on helposti syttyvää ja palavaa. Puukuidun huonoa palonkestoa voidaan parantaa tarvittaessa palonsuoja-aineilla. Ulkokäyttöön tarkoitettut tuotteet kellastuvat ultraviolettisäteilyn vaikutuksesta, jos komposiitissa on korkea muovipitoisuus. UV-säteilyn vaikutuksia voidaan vähentää esimerkiksi käyttämällä tummaa väriainetta tai käyttämällä komposiitin pintaan UV-stabiloitua muovia.

Puukuitu lisää kestopuovin lujuutta: mitä pidempi- ja kapeampikuituinen lujite-materiaali on, sitä enemmän lujuus kasvaa. Ekstuusiolla tai ruiskuvalulla valmistettu komposiitti sisältää lyhyitä puukuituja, jotka toimivat täyteaineiden tapaan. Täyteaine muovituotteessa jäykistää materiaalia ja lisää mittapysyvyyttä (Poikelispää 2004, 23). Kuidun partikkelikoko ja määrä vaikuttavat myös olennaisesti komposiitin ominaisuuksiin. Liian korkea kuitupitoisuus ja liian suuri partikkelikoko heikentää iskulujuutta ja vaikuttaa negatiivisesti venymään. Lujuusominaisuuksiin vaikuttaa myös kuitujen orientoituminen prosessoinnissa virtaussuuntien mukaan. Puukuidun lisääminen kestopuoviin vähentää virumista, jos puu ja muovi ovat hyvin sitoutuneet toisiinsa. Puukuidun lisääminen ei paranna komposiitin pakkasenkestävyyttä matriisimuoviin verrattuna. (Koto & Tiisala 2004.)

Puukuitulujitteista muovituotetta voi yleensä työstää puuntyöstökoneilla. On kuitenkin otettava huomioon että puuntyöstökoneet ja esimerkiksi vasarointi vaurioittavat muovipintaa ja puukuitu altistuu lialle ja kosteudelle. Kosteus heikentää komposiitin mekaanisia ominaisuuksia sekä turvottaa ja lahottaa puukuitua. Komposiitteja voidaan myös hitsata ja lämpömuovata kestopuovien tapaan. Kuitenkin jos komposiitti sisältää suuren osan puukuitua, se ei välttämättä hitsaudu kunnolla. (Koto & Tiisala 2004.)

Kestomuovia sisältävä puumuovikomposiitti on hyvin kierrätettävää ja ekologista verrattuna perinteisiin komposiitteihin. Se voidaan kierrättää materiaalina, toisin kuin esimerkiksi lasikuitua sisältävä komposiitti. Puukuitu on luonnossa hajoavaa ja uusituvaa. Puumuovikomposiitista valmistettu tuote voidaan elinkaarensa lopussa käyttää hyödyksi lämmöntuotannossa. (VTT 2003.)

3.2 Kierrätysmuovin käyttö puumuovikomposiitissa

Englanninkielinen lyhenne WRPC muodostuu sanoista wood/recycled plastic composites eli suomennettuna puu/kierrätysmuovikomposiitit. Jo siitä voidaan päätellä, että kierrätysmuovia käytetään puumuovikomposiiteissa. Muovijäte muodostaa suuren osan maailmassa syntyvästä kiinteästä jätteestä. Kierrätysmuovia on olemassa paljon, ja se on hinnaltaan edullista raaka-ainetta. Kierrätysmuovin käyttö puumuovikomposiitissa vähentää kaatopaikoille kuljetettavan jätteen määrää. (Cui ym. 2008, 655.) Huomattava määrä polyolefiineja, kuten esimerkiksi muovipullot ja pakkaukset voitaisiin mahdollisesti kierrättää (Ashori & Nourbakhsh 2009, 1291). Puumuovikomposiitissa käytetty puu on useimmiten kierrätettyä; sahoilta jätteeksi jäänyttä purua tai lastua (Cui ym. 2008, 655). Koska puumuovikomposiitit ovat ilmeisesti alun perin puujätteen kierrättämiseksi suunniteltuja materiaaleja, tuntuu luonnolliselta käyttää niihin myös kierrätettyä muovia.

Kierrätetyn kestopuovien käyttöä puumuovikomposiitissa on tutkittu melko paljon, koska nämä komposiitit ovat edullisempia kuin kilpailevat materiaalit, mukaanlukien ne komposiitit, joissa on käytetty uutta puukuitua. Tutkimusten mu-

kaan komposiitin ominaisuudet eivät olennaisesti muutu vaikka neitseellisen muovin tilalla käytetään kierrätysmuovia. (Cui ym. 2008, 655.)

Kierrätysmuovin käytöstä puumuovikompositissa on tehty joitakin tutkimuksia. Eräässä tutkimuksessa valmistettiin kierrätetyistä, kuluttajilta kerätyistä PE-HD-pakkauksista ja sahanpurusta puumuovikomposiittia. Puukuidun lisääminen paransi tässä tapauksessa taivutuslujuutta mutta heikensi iskulujuutta. Pidemmät puukuidut kasvattivat taivutuskerrointa; samalla isku-, ja taivutuslujuudet heikkenivät. (Cui ym. 2008, 661.)

Eräässä toisessa tutkimuksessa valmistettiin sanomalehdistä ja kierrätetystä PE-HD:stä tai polypropeenista. Komposiitit olivat ominaisuuksiltaan yhtä hyviä, paitasi joissain testeissä vertailumateriaalina käytetyllä polyeteenillä saatiin paremmat tulokset. Kytkentäaineen kanssa saatiin kestäviä ja tasalaatuisia tuotteita. (Ashori & Nourbakhsh 2009, 1295.)

3.3 Puumuovikomposiittien käyttömahdollisuuksia

Puumuovikomposiitista valmistetun tuotteen käyttökohteessa on otettava materiaaleista aiheutuvat rajoitukset. Puumuovikomposiittia voidaan muovata kuten muovia ja sahata kuin puuta. Lisäksi erilaisten muovien ja puukuitujen yhdistelmiä on lukemattomia. Tällä ajattelutavalla puumuovikomposiittein käyttömahdollisuudet ovat kiinni tuotteen valmistajan mielikuvituksesta.

Eniten puumuovimateriaaleista valmistetaan erilaisia rakennuselementtejä. Tällaisia ovat terassilaudat, lattialaatat, ikkunalistat sekä erilaiset paneelit ja profiilit. Puumuovikomposiitista valmistettuja rakennuselementtejä myydään ja valmistetaan eniten Yhdysvalloissa, missä niille on myös suurimmat markkinat. Erikoisempia sovelluksia ja tulevaisuudennäkymiä ovat erilaisten laitteiden koteloinnit, putket, kompostorit ja kylpyhuonekalusteet.

Puumuovikomposiittia voidaan käyttää sähkölaitteiden, kuten vatkainten, imurien ja porakoneiden koteloiden materiaalina. Koteloinnit valmistetaan ruiskuvalamal-

la. Puumuovimateriaalilla on pieni muottikutistuma, joten valmiista tuotteesta saadaan mittatarkka. Koteloidessa käytetään usein teknisiä muoveja. Puumuovikomposiitti on edullisempi vaihtoehto ja se käyttö kotelossa voi alentaa koko laitteen hintaa. Koska puumuovikomposiitti on jäykempää, laitteesta voidaan saada hiljaisempi, kun kotelon osat eivät värähtele koneen käydessä. (Koto & Tiisala 2004, 6.)

Puumuovikomposiitista rotaatiovalulla valmistettu kompostori on puumaisen ulkonäkönsä vuoksi huomaamaton puutarhassa. Kompostorissa tärkeä ominaisuus on lämmöneristys: puumuovikomposiittia voidaan vaahdottaa hyvin eristäväksi. Vaahdotettuna puukuitulujitteinen muovi on kevyttä ja kompostori on helppo tyhjentää. Seinämät voidaan myös tehdä ohuemmiksi kuin pelkästä muovista valmistetussa kompostorissa, koska puukuitu lujittaa materiaalia. Kompostorien osalta on tehty tutkimuksia erilaisten puulajien vaikutuksesta materiaaliin. Lämpökäsitelty puu vähentää kostetuden imeytymistä ja voi siten parantaa kompostorin eristystä. Mielenkiintoinen mahdollisuus on käyttää komposiitissa pahanhajuista puulajia, jolloin kompostoriin pyrkivät jyrsijät perääntyisivät. (Koto & Tiisala 2004, 9.)

Kylpyhuonekalusteissa ehkä tärkein ominaisuus on kosteudenkesto. Puumuovikomposiitin kosteudenkesto voidaan vaikuttaa puulajin valinnalla, mutta kalusteita voidaan myös pinnoittaa (Koto & Tiisala 2004, 5). Puumuovikomposiitista valmistetut altaat ja ammeet ovat kevyitä ja poikkeavat ulkonäöltään virkistävästi totutuista kylpyhuonekalusteista (Koto & Tiisala 2004, 11). Puumuovimateriaalista valmistetut kalusteet ovat myös paremmin kierrätettävissä kuin yleisesti käytetyt keraamiset altaat ja ammeet.

4 TUTKIMUKSET

Tarkoituksena oli selvittää, voidaanko puumuovikomposiitissa matriisimuovina käytettävä polyeteeni korvata kokonaan tai osittain monikerroskalvojätteellä. Tätä varten valmistettiin granulaattia neljästä eri materiaaliyhdistelmästä, jotka sisälsivät monikerroskalvojätettä ja puukuitua. Sekä komposiitissa käytettävä puukuitu että monikerroskalvo ovat tuotantoprosessin sivuvirtana syntyvää jätettä. Kumpaakaan komposiitin materiaaleista ei voi sellaisenaan kierrättää.

Sekoitukset ja granulointi (liite 1) tehtiin TTY:n Muovi- ja elastomeeritekniikan laboratoriossa Sastamalassa. Sekoitusekstruuderina käytettiin Brabender DSE 25 kaksiruuviekstruuderia. Granulointi oli paikoin haastavaa. Raaka-aineet tulivat hyvin hitaasti ekstruuderin läpi. Paperia sisältävät materiaalit kostuivat ekstruuderin jälkeisessä jäädytysaltaassa ja tukkivat granulaattorin, joten ne paloiteltiin granulaateiksi käsin. Kuvissa (kuvat 1–4) näkyvä ero granulaattien pinnanlaadussa johtuu epätasaisesta syöttönopeudesta. Materiaalia jouduttiin välillä pakottamaan ekstruuderiin, joten syöttönopeus vaihteli jonkin verran. Varsinkin paperia sisältävissä materiaaleissa esiintyi tällöin sulamurtumaa.

Granulaateista ruiskuvalettiin koesauvoja testauksia varten. Ruiskuvalua varten materiaalit kuivattiin. Ruiskuvalussa oli odotettavissa olevia ongelmia: materiaali tukki syöttöaukkon ja paperi oli vaarassa palaa. Koesauvoja kuitenkin saatiin valmistettua noin 40 kappaletta kaikista koemateriaaleista. Ruiskuvalun ajoarvot ovat liitteessä 2.

Ensimmäinen koemateriaali valmistettiin pelkästä PE/PA-kalvosilpusta. Materiaali oli kuivaamatonta. Massan lämpötila jätettiin tarkoituksella alle polyamidin plastisoitumislämpötilan, jotta saatiin vertailukelpoisia tuloksia. Polyamidin sulamislämpötila on niin korkea, että muissa koemateriaaleissa oleva paperi hajoaa ennen sen saavuttamista. Monikerroskalvossa oleva polyamidi jää komposiitissa sulamatta ja toimii lujitteena yhdessä paperin kanssa.



KUVA 1. PE/PA-granulaattia

Toinen koemateriaali oli PE/PA-kalvo ja paperi. Paperi oli lähtötilanteessa samankokoisena silppuna kuin kalvokin. Tarkoituksena oli valmistaa koemateriaalia sekoitussuhteella 60 m- % paperia ja 40 m- % kalvoa. Käytännössä muovia tarvittiin kuitenkin enemmän ja sekoitussuhteeksi valittiin 1:1. Koska puukuitu tummui, tässä vaiheessa laskettiin myös prosessontilämpötiloja.



KUVA 2. Kalvoa ja paperia sisältävä granulaatti

Seuraaviin kahteen koemateriaaliin lisättiin kalvon ja paperin lisäksi kytKentäainetta. Molemmissa erissä sekoitussuhde oli 50 % kalvoa, 47 % paperia ja 3 % kytKentäainetta.



KUVA 3. Kalvoa, paperia ja kytKentäainetta A sisältävä granulaatti



KUVA 4. Kalvoa, paperia ja kytKentäainetta B sisältävä granulaatti

4.1 Sulaindeksi

Sulaindeksi (MFR) mittaa muovin sulaviskositeettiä. Sulaindeksi määritetään sulattamalla polymeeri mittalaitteen sylinterissä, jonka jälkeen se puristetaan ulos tietynkokoisesta suuttimesta männän avulla. Mäntään valitaan mitattavalle muoville sopiva paino ja sylinteriin lämpötila. Koemateriaalille valitaan myös näytteenottoväli oletettavissa olevan sulaindeksin mukaan. Aina valitun ajan kuluttua suuttimesta valunut nauha leikataan poikki. Lopuksi näytteet punnitaan. Sylinterin sisältämästä materiaalista otetaan kolme näytettä. Tulokseksi saadaan grammoina muovimäärä, joka on valunut suuttimesta kymmenen minuutin aikana. Sulaindeksin tuloksista saadaan tietoa polymeerin moolimassan suuruudesta, sen työstettävyydestä ja valmiin tuotteen lujuudesta. (Järvelä & Heikkinen 2009.)

Sulaindeksin mittaamisessa käytettiin standardia ISO 1133. Sylinterin lämpötila oli 200 °C ja paino 5 kg. Suuttimen halkaisija oli 2,08 mm. Näytteenottoväliksi valittiin 240 sekuntia, koska etukäteen oli jo tiedossa, etteivät koemateriaalit olleet kovin juoksevia. Sylinteriin laiteettiin kuusi grammaa koemateriaalia granulaatteina. Koemateriaalia lämmitettiin kuusi minuuttia ennen mittausta.

Ensimmäiseksi testattiin monikerroskalvosta valmistettu PE/PA-granulaatti. Materiaalin sulindeksi jäi pieneksi. Valuminen oli hidasta; 240 sekunnin näytteenottovälillä olisi saatu kuudesta grammasta granulaattia kymmenkunta näytettä. Mäntään olisi voinut lisätä painoa mittausten nopeuttamiseksi, mutta viiden kilon painolla saatiin useampi tulos keskiarvon laskemista varten. Tulokseksi saatiin viiden mittauksen keskiarvona 0,37 g/ 10 min (200 °C, 5 kg).

Kalvoa ja paperia sisältävää granulaattia mitattiin aluksi samoilla arvoilla. Suuttimesta ei kuitenkaan tullut materiaalia ulos, joten lämmitysaikaa pidennettiin ja mäntään lisättiin painoja. Koe lopetettiin, kun materiaalia ei valunut suuttimesta, vaikkakaan mäntään oli lisätty suurimmat mahdolliset painot (21,6 kg) ja materiaalia oli lämmitetty 15 minuuttia. Kuten kuvasta 5 nähdään, sylinterissä oleva materiaali oli sulanut, mutta ilmeisesti paperikuidut eivät mahtuneet suuttimesta ulos.



KUVA 5. Kalvoa ja paperia sisältävä koemateriaali irrotettuna sulaindeksilaitteen sylinteristä

4.2 Iskukoe

Iskukoe mittaa testattavan materiaalin murtumiseen tarvittavaa energiaa. Koska muovit ovat viskoelastisia materiaaleja, niiden lujuus on riippuvainen kuormitusnopeudesta. Muovien vetolujuus on usein suurempi kuin iskulujuus, eli muovit kestävät iskumaista kuormaa huonommin kuin hitaasti kasvavaa kuormaa. (Jönkkäri 2004, 76.)

4.2.1 Periaate

Materiaalin iskulujuuden määrittämiseksi on useita eri tapoja; yleisimmin käytetään heilahdusvasara-iskukoetta, joita on olemassa kolmenlaisia. Näissä on samantyyppinen iskevä vasara, jolla koekappaletta lyödään kerran suurella nopeudella. Izod-, Charpy- ja vetoiskumenetelmät eroavat toisistaan näytteen kiinnityksessä. Izod-iskukokeessa koesauva kiinnitetään toisesta päästään kohtisuoraan iskusuuntaa vastaan, kun taas Charpy-menetelmässä sauva on tuettu molemmista päistään vaaka-asentoon. Vetoiskukokeessa iskun suuntaisesti kiinnitetyn koesauvan päähän on kiinnitetty palikka, jonka välityksellä iskuenergia siirtyy koekappaleeseen. Vetoiskukoetta suositellaan käytettäväksi ohuihin koekappaleisiin. (Jönkkäri 2004, 76.)

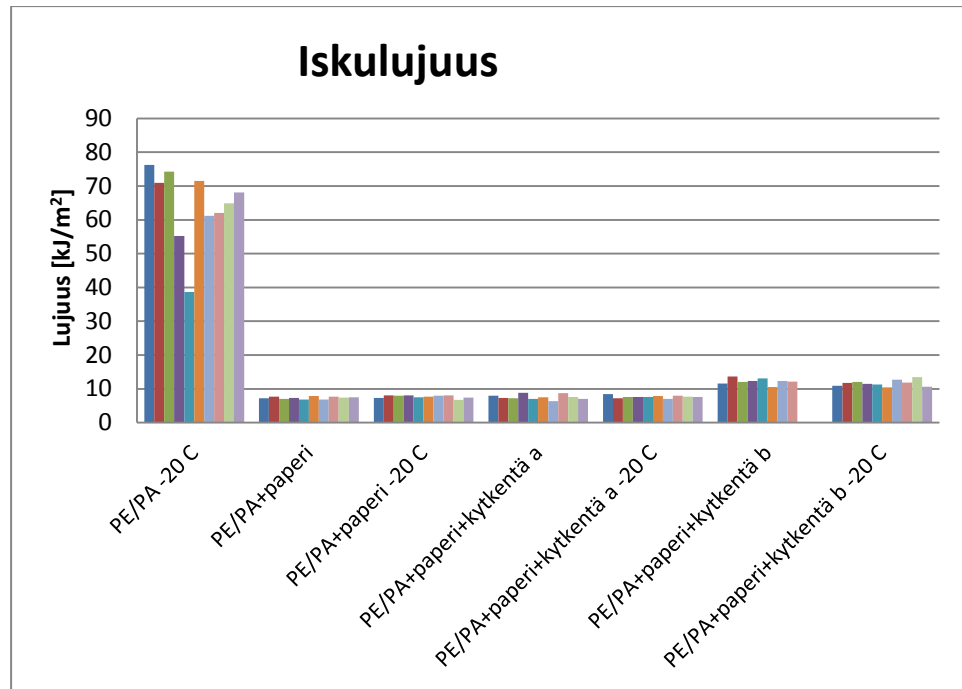
Heilahdusvasarauskokeessa vasara heilahtaa sitä korkeammalle, mitä helpommiin testattava materiaali murtuu. Erilaisille näytteille, esim. sitkeille ja hauraille muoveille, voidaan käyttää eripainoisia vasaroita. Eripainoisten vasaroiden antamat tulokset eivät kuitenkaan ole sellaisenaan vertailukelpoisia. (Jönkkäri 2004, 76.) Iskulujuus ilmoitetaan absorboidun energian ja poikkipinta-alan suhteena, ja sen yksikkö on J/m^2 . Iskukokeessa on useita epävarmuustekijöitä, joten on tehtävä useita rinnakkaismittauksia luotettavien tulosten saamiseksi. (Järvelä & Heikkinen 2009.)

Iskukokeessa voidaan käyttää joko lovettuja tai loveamattomia näytteitä. Kahden eri muovin loveamattomalla ja lovetulla koesauvalla saatuja tuloksia ei voi verrata keskenään, koska loviherkkyys vaihtelee suurestikin materiaalista riippuen. Lovetut iskukokeet kertovat valmiin muovituotteen kannalta tärkeää tietoa materiaalin loviherkkyydestä. (Jönkkäri 2004, 76.)

Muovien mekaaniset ominaisuudet ovat usein riippuvaisia lämpötilasta. Huoneenlämmössä tehdyt iskulujuuskokeet eivät kerro mitään muovin iskunkestävyydestä muissa lämpötiloissa. Esimerkiksi sama koesauva, joka ei huoneenlämmössä katkea iskukokeessa, saattaa murtua helposti -20 °C :n lämpötilassa. Iskukokeet tulee aina tehdä paitsi vertailtavuuden takia huoneenlämmössä, myös muovin suunnittelussa käyttölämpötilassa. (Jönkkäri 2004, 77.)

4.2.2 Tulokset

Tässä työssä koemateriaalit testattiin Charpy-menetelmällä. Kaikki neljä materiaalia testattiin huoneenlämmössä loveamattomana sekä pakastettuna (-20 °C). Pakastetut koesauvat olivat myös loveamattomia. Kaikkiin testisarjoihin pyrittiin saamaan kymmenen rinnakkaismittausta. Kytkenäainetta B sisältäviä koesauvoja testattiin huoneenlämpöisinä vain kahdeksan kappaletta, koska enempää koesauvoja ei ollut.



KUVIO 2. Charpy-iskulujuusmittausten tulokset

Monikerroskalvosta tehdyt osoittautuivat sitkeiksi huoneenlämpöisinä: ne eivät katkenneet iskukokeissa vaan vain taipuivat. Pakastettuna niiden iskusitkeys heikkeni huomattavasti. Kaikki paperia sisältävät koesauvat olivat hauraita jo huoneenlämmössä, eikä pakastaminen vaikuttanut tuloksiin juuri mitenkään. Osassa paperia sisältävistä koemateriaaleista pakastetuista sauvoista saatiin jopa paremmat tulokset kuin huoneenlämpöisistä. Paperia sisältävistä materiaaleista parhain iskulujuus oli kytkentäainetta B sisältävillä koekappaleilla.



KUVA 6. Iskukoekappaleita

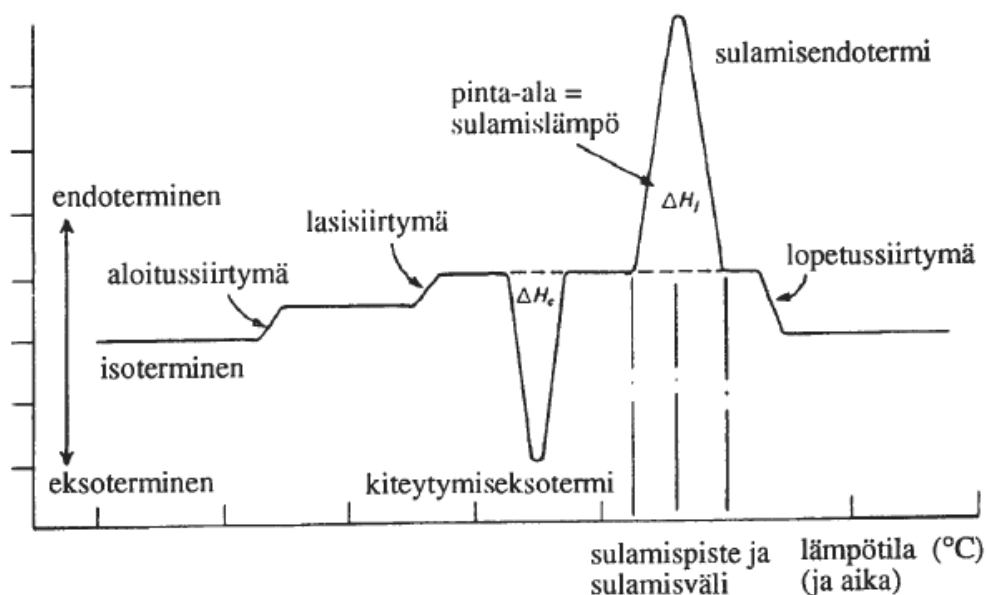
Kuvassa 6 on testattuja iskukoe-kappaleita. Alimmaisena on huoneenlämpöisenä testattu PE/PA-koe-kappale, keskimmaisena pakastettu PE/PA ja ylimmäisenä komposiittimateriaali.

4.3 Differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria (DSC)

4.3.1 Periaate

DSC eli differentiaalinen pyyhkäisykalorimetria on termooanalyttinen muovien tutkimusmenetelmä. DSC:a käyttämällä voidaan määritellä näytteen sitoma tai näytteestä vapautuva energia lämpötilan tai ajan funktiona. DSC-laitteisto vertaa tutkittavan näyteupokkaan ja vertailu-upokkaan välistä lämpötilaeroa. Mittausten perusteella laite pyrkii pitämään molemmissa upokkaissa yhtä suuren lämpötilan. Tätä varten joko näytteeseen tai vertailuaineeseen tuodaan tarvittava lämpöenergiämäärä. Laite mittaa tämä energiamäärän ja piirtää sen perusteella DSC-käyrän. Käyrästä käy ilmi näytteen aikayksikössä sitoma tai luovuttama energia lämpötilan funktiona. (Järvelä & Heikkinen 2009.) Analyysikäyrälle syntyvistä piikeistä sekä itse analyysikäyrän muutoksista voidaan tehdä päätelmiä. Piikin suunnasta saadaan tietoa reaktiotyypistä, piikin muodosta entalpiamuutoksen suuruus ja piikin paikasta tapahtumalämpötila.

DSC-käyrästä voidaan selvittää tutkittavan muovin tuotannon ja tunnistamisen kannalta tärkeitä lämpötiloja. Sulamis-, kiteytymis ja lasittumislämpötila näkyvät DSC-käyrässä. Lisäksi voidaan selvittää ainakin sulamislämpö, kiteytymislämpö ja kiteisyysaste. Mahdollisten kemiallisten reaktioiden reaktiolämmöt näkyvät myös DSC-käyrässä. DSC:lla saatuja tuloksia voidaan käyttää hyväksi laadunvalvonnassa ja tuotannon ongelmien ratkaisemisessa. Tuloksia voi käyttää apuna muovin, polymeeriseosten tai lisäaineiden tunnistamisessa. (Järvelä & Heikkinen 2009.)



KUVIO 3. Kuvitteellinen DSC-käyrä, jossa esitetään mahdollisia transitoita (Kaukonen 1994, 18)

4.3.2 Tulokset

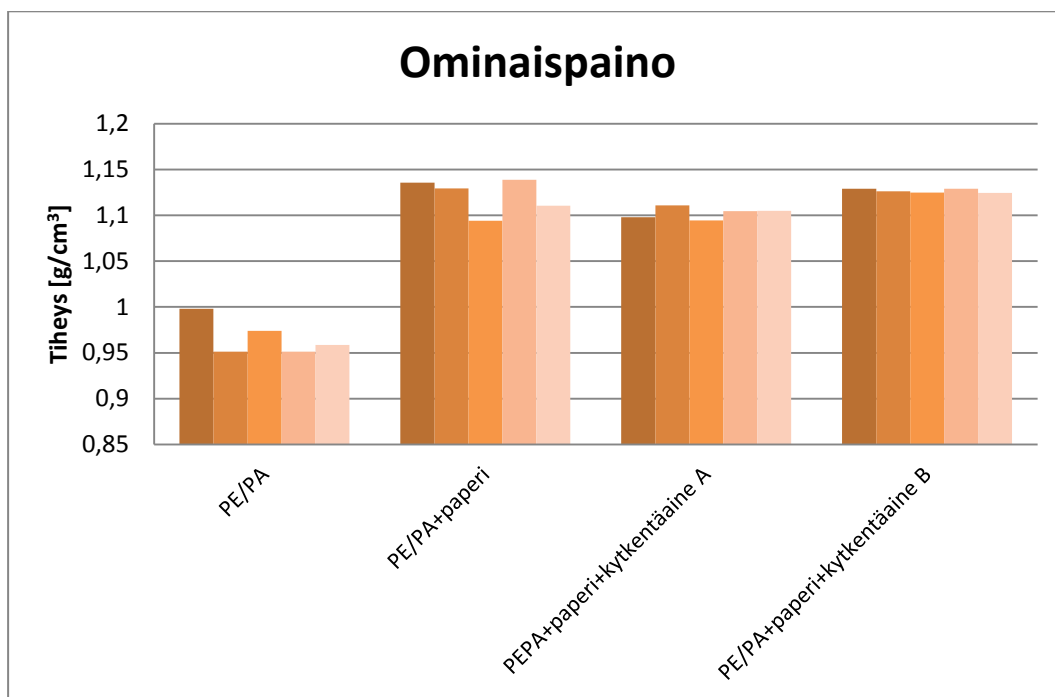
Mittauksissa käytetyt näytepalat leikattiin koesauvoista, koska ne olivat käyneet jo läpi kaksi työstövaihetta ja vastasivat näin paremmin materiaalista mahdollisesti valmistettavaa lopputuotetta. DSC-mittauksissa kaikkien koemateriaalien lämpötilaa muutettiin 20 °C minuutissa aloittaen 40 °C:sta, jonka jälkeen näyte jäähdytettiin ja lopuksi kuumennettiin. Ensimmäiset DSC-mittaukset tehtiin suurelle lämpötilavälille, jotta saatiin näkyviin kaikki mahdolliset tulokset. Tällainen pidempi mittaus, jossa materiaaleja jäähdytettiin -100 °C:seen ja sen jälkeen kuumennettiin 300 °C:seen, tehtiin kerran sekä pelkkää kalvoa sisältävälle näytteelle sekä kalvoa ja paperia sisältävälle näytteelle. Lämpötiloissa 0 °C- (-100 °C) ei vaikuttanut tapahtuvan mitään, joten lopuissa mittauksissa näytteitä ei jäähdytetty alle nollan asteen. Kaikista neljästä materiaalista tehtiin kaksi mittausta.

DSC-käyristä (liite 5) nähtiin monikerroskalvossa olevien muovien sulamispisteet ja sulamisvälit. Nämä näkyivät kaikkien mittausten tuloksissa. Lähes kaikista käyristä oli luettavissa yksi selvä lasittumislämpötila, joka voisi olla kalvossa käytetyn polyamidin. Toisen muovin lasittumislämpötilaa ei näy käyrillä, se on toden-

näköisesti jossakin alle sadan pakkasasteen. Myös muita pienempiä muutoksia näkyi käyrillä, mutta ne saattoivat olla vain yhdessä tai muutamassa käyrässä. Näistä muutoksista ei juuri voi tehdä erityisiä päätelmiä, koska ne esiintyivät käyrissä vaihtelevasti ja olivat eri kohdissa. Pienet muutokset saattavat olla peräisin esimerkiksi kalvossa olevia muoveja yhdistävästä kerroksesta, jollaisia on PE/PA-kalvoissa usein.

4.4 Ominaispainomittaus

Ominaispaino eli tiheys voidaan mitata monella eri tavalla. Tiheys on olennainen muovin ominaisuus, jonka perusteella voidaan mm. määrittää lopputuotteelle sopivat tuotantoparametrit. Tässä työssä ominaispaino selvitettiin käyttämällä Arkhimedeen periaatetta: nesteeseen upotettuun kappaleeseen kohdistuu noste, joka vastaa kappaleen syrjäyttämän nesteen painoa. Koekappale punnittiin ilmassa ja sen jälkeen nesteessä, jonka tiheys on tunnettu. Nesteinä käytettiin 20-asteista vettä, jonka tiheys on $0,99 \text{ g/cm}^3$.



KUVIO 4. Koemateriaalien ominaispainomittausten tulokset

Ainoastaan PE/PA-kalvoa sisältäneen granulaatin tiheys oli veden tiheyttä pienempi. Paperia sisältäneet koemateriaalit olivat hieman tiheämpiä kuin vesi.

4.5 Kovuusmittaus

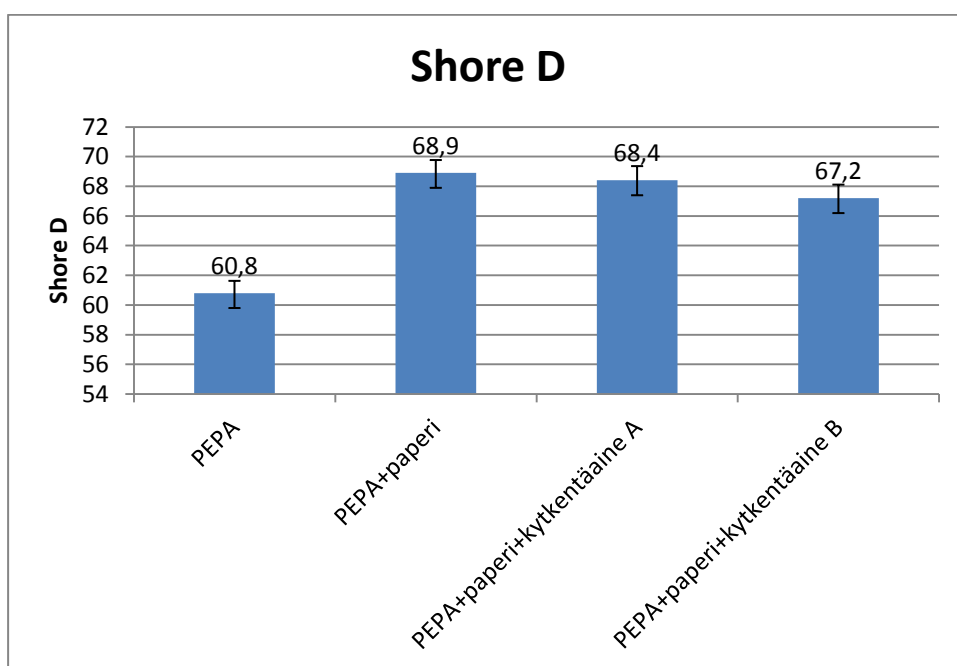
4.5.1 Periaate

Kovuusmittauksessa mitataan materiaalin pinnan kykyä vastustaa muodonmuutosta staattisen kuormituksen alaisena. Mittaus suoritetaan painamalla standardisoitua kärkikappaletta materiaalin pintaan. Tulokseksi saadaan syntyneen painauman koko. Kovuuden arvo on sitä suurempi, mitä pienempi on painauma. Kovuusmittauksissa on otettava huomioon muovien taipumus virumiseen kuormitettaessa. Kärkikappaleen jättämä painauma saattaa palautua jonkin ajan kuluttua takaisin sileäksi pinnaksi. (Jönkkäri 2004, 78.)

Yleisimmät muovien kovuusmittaustekniikat ovat Shore- ja Rockwell-kovuudet. Eri kovuusmittausmenetelmillä saadut tulokset eivät ole vertailukelpoisia keskenään. (Jönkkäri 2004, 78.) Muoveilla käytetyin ja samalla vertailukelpoisin menetelmä on Shore-kovuusmittaus. Menetelmää voidaan pitää empiirisenä, ja se on tarkoitettu ensisijaisesti kontrollimenetelmäksi. (Järvelä & Heikkinen 2009.) Shore-kovuus mitataan durometrillä, jossa on käytössä kahdenlaisia painimia. Tylppä A-kärki on tarkoitettu pehmeille muoveille ja elastomeereille ja terävä D-kärki koville ja sitkeille muoveille. Kärkeä painetaan vakiokuormalla tasaiselle pinnalle. Painauman syvyyden ja aineen perusominaisuuksien välillä ei vallitse yksinkertaista riippuvuutta (Järvelä & Heikkinen 2009). Shore-kovuus voidaan ilmoittaa joko painumana tietyllä hetkellä (0, 15 ja/tai 60s) tai mittakärjen painumana ajan funktiona. Shore-yksiköt määritellään käytetyn mittakärjen mukaan. Shore A -asteikko kattaa alueen 20A–95A ja Shore D -asteikko alueen 40D–90D. A- ja D-menetelmät ovat vertailtavissa siten, että 40 yksikköä Shore D -kovuutta vastaa 90 Shore A -yksikköä. (Jönkkäri 2004, 79.)

4.5.2 Tulokset

Mittaukset suoritettiin standardin ISO 868 mukaisesti. Koesauvoja vakioitiin 25 tunnin ajan ennen testausta ilman kosteusprosentin ollessa 50 ja lämpötilan 23 °C. Koemateriaalit olivat kovia, joten mittauksissa käytettiin terävää Shore D -kärkeä. Mittaukset tehtiin joka materiaalissa viidestä koesauvasta, joista kaikista otettiin kaksi mittausta. Mittakellon lukema otettiin 15 sekunnin päästä mittakärjen painamisesta kappeleeseen. Hajonta yksittäisten materiaalien tulosten kesken oli hyvin pientä.



KUVIO 5. Kovuusmittausten tulokset

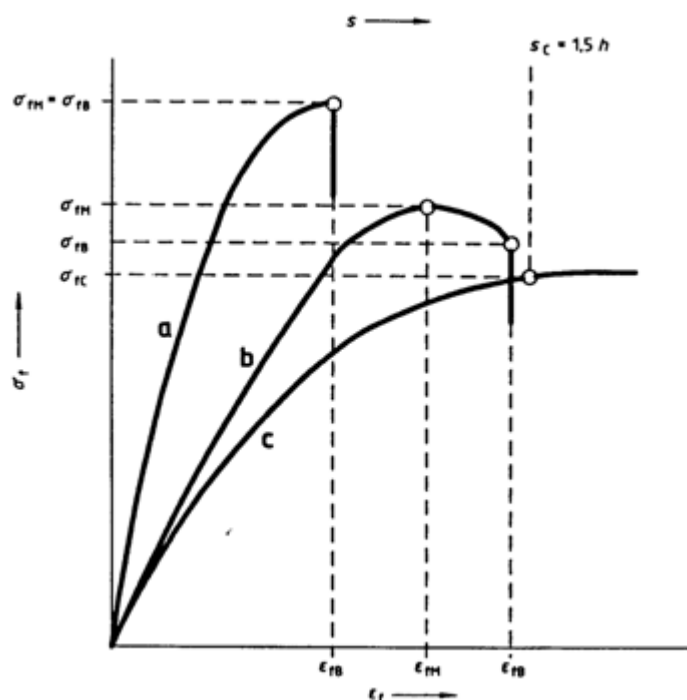
Kaikki materiaalit olivat pinnaltaan kovia. Paperin lisääminen matriisimuoviin toi mittausten perusteella lisää kovuutta materiaalin pintaan. Paperia sisältävien materiaalien tulokset olivat keskenään lähes samat. Kytkentäaineen lisäys materiaaliin vaikuttaisi hieman vähentävän pinnan kovuutta.

4.6 Taivutuskoe

Taivutuskoea käytetään materiaalin jäykkyyden mittaamiseen. Siinä tukien päällä olevaa koekappaletta taivutetaan keskikohdastaan vakionopeudella murtumiseen asti, tai kunnes kappaleen muodonmuutos saavuttaa tietyn arvon. Kokeen aikana mitataan kappaleeseen kohdistuva voima. Taivutuskoe tehdään usein materiaaleille, jotka joutuvat käyttökohteessaan taivuttavaan kuormitukseen. Taivutuskoe kertoo muovin jäykkyydestä ja lujuudesta samoin kuin vetokoekin. (Jönkkäri 2004, 75.) Materiaalin lujuutta voidaan mitata, jos koekappale murtuu kokeen aikana. Useimmilla kestopuoveilla on suuri murtovenymä taivuttavassa kuormassa, eivätkä ne murru taivutuskokeessa ollenkaan, vaan kokeen loppuvaiheessa luistavat tukien välistä. (Jönkkäri 2004, 74.)

4.6.1 Periaate

Taivutuskoe voidaan toteuttaa kahdella menetelmällä: kolmipiste- tai nelipiste-taivutuksella. Kolmipistetäivutuksessa koesauva on tuettu molemmista päistään ja sitä taivutetaan yhdellä painimella tukien välistä. Nelipistetäivutuksessa käytetään kahta paininta. (Jönkkäri 2004, 74.) Koesauvaa kuormitetaan tasaisella nopeudella samalla mitaten kuormitusta ja sauvan keskikohdan taipumaa. Taivutus aiheuttaa sauvan yläpintaan puristusjännityksen ja alapintaan vetojännityksen. Lisäksi sauvaa rasittavat leikkauskuormat. (Järvelä & Heikkinen 2009.) Kokeesta saadaan tuloksesksi voima-siirtymäkäyrä, josta lasketaan jännitys-taipumakäyrä. Tuloksesksi saatavat suureet ovat taivutuskimmomoduuli E , taivutusjännitys σ ja taipuma ϵ . Kuviossa 6 nähdään tyypillisiä taivutuskokeesta saatavia jännitys-taipumakäyriä. Käyrä a on tyypillinen materiaalille joka murtuu ennen myötämistä. Käyrä b on materiaalille, joka saavutettuaan maksimilujuuden myötää ennen murtumista. Käyrän c materiaalilla ei ole myötöpistettä eikä se myöskään murru. (Jönkkäri 2004, 75.)

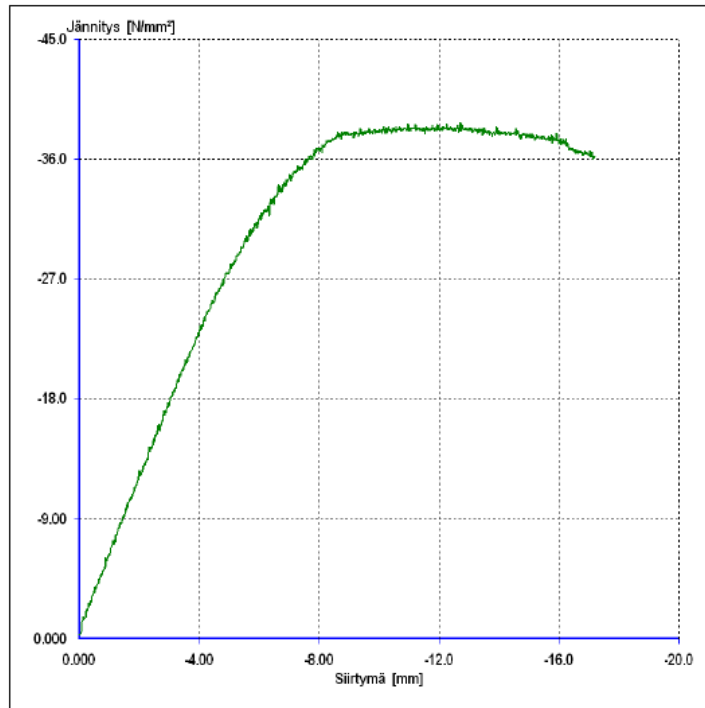


KUVIO 6. Tyypillisiä taivutuskokeessa saatavia jännitys-taipumakäyriä (Jönkkäri 2004, 75)

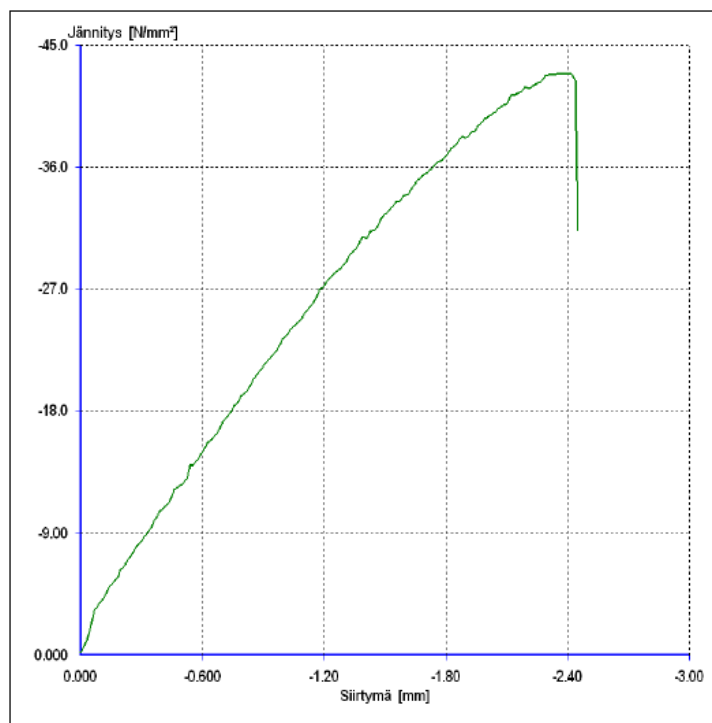
4.6.2 Tulokset

Kokeet tehtiin standardin SFS-EN ISO 178A1 mukaisesti. Kaikista neljästä koemateriaalista tehtiin viisi rinnakkaiskoetta. Taivutuskokeet tehtiin kolmipistetaivutuksella. Tukien väli oli 64 mm ja materiaali teräs. Testausnopeus oli 2 mm/min. Koesauvoja vakioitiin ennen testausta olosuhteissa, joissa lämpötila oli 23 °C ja ilman kosteusprosentti 50.

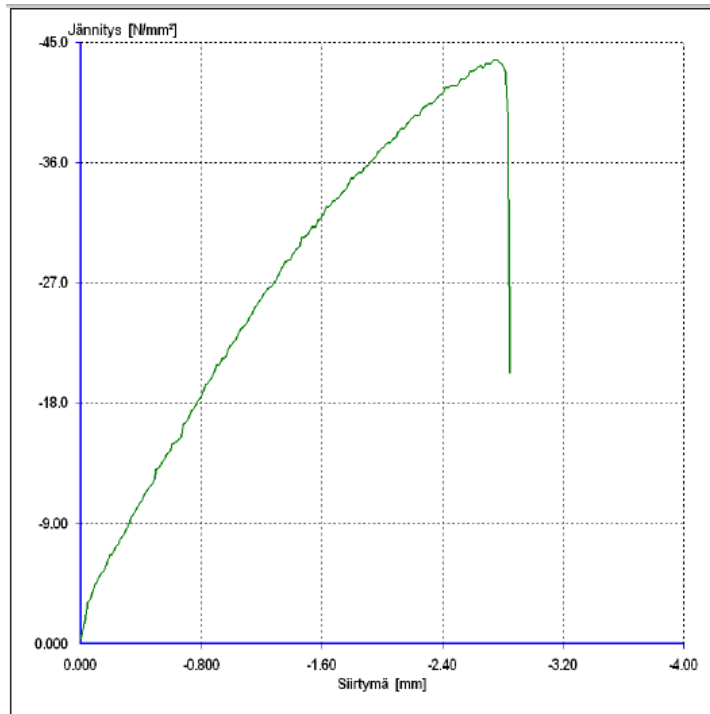
PE/PA-kalvosta valmistetut koesauvat osoittautuivat sitkeiksi. Sauvat eivät murtuneet kokeen aikana, eikä niistä löytynyt myötökohtaa. Taivutuslujuus laskettiin määritellyn taipuman (1,5 h) kohdalla (kuvio 7). Loput koemateriaalit sisälsivät paperia, ja niiden tulokset olivat keskenään hyvinsamankaltaisia. Materiaalit olivat hauraita. Niillä esiintyi kokeessa maksimikohta, jonka jälkeen ne murtuivat (kuviot 8, 9 ja 10).



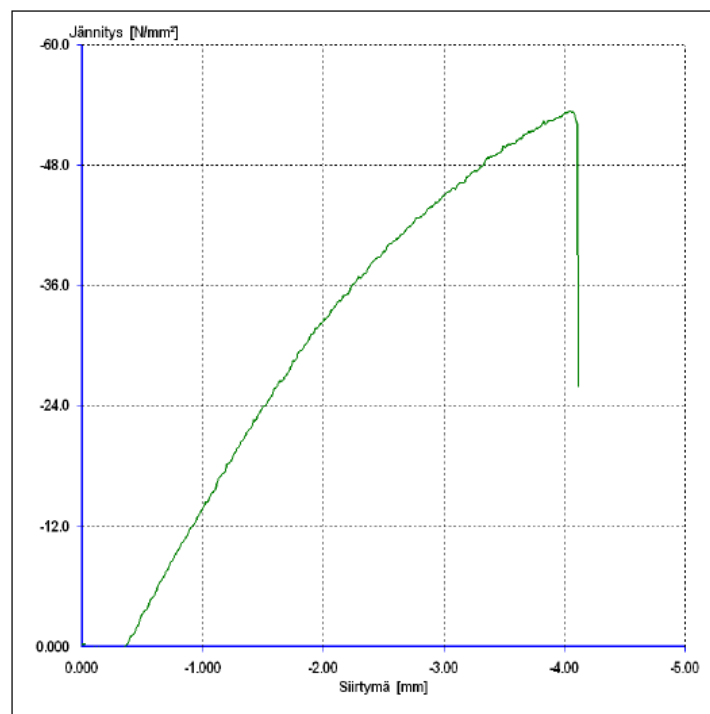
KUVIO 7. PE/PA-kalvoa sisältävän koemateriaalin jännitys-siirtymäkäyrä taivutuskokeessa.



KUVIO 8. Kalvoa ja paperia sisältävän koemateriaalin jännitys-siirtymäkäyrä taivutuskokeessa



KUVIO 9. Kalvoa, paperia ja kytkentäainetta A sisältävän koemateriaalin jännitys-siirtymäkäyrä taivutuskokeessa

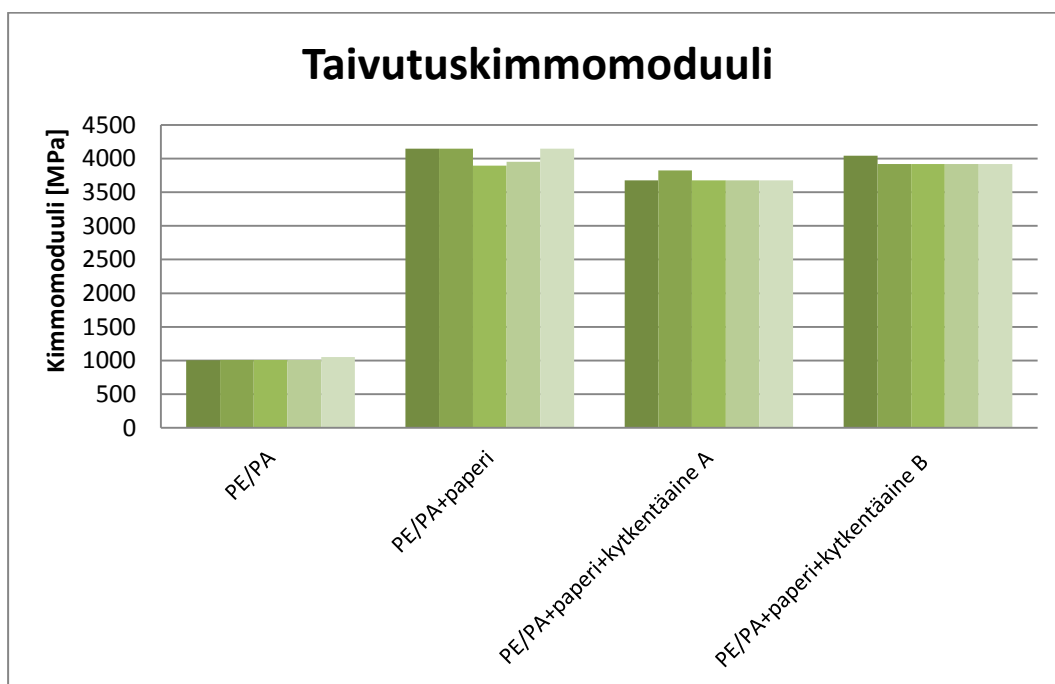


KUVIO 10. Kalvoa, paperia ja kytkentäainetta B sisältävän koemateriaalin jännitys-siirtymäkäyrä taivutuskokeessa

KytKentäainetta B sisältävä koemateriaali luisti tukien päällä kokeen loppuvaiheessa (liite 9) kolmessa kokeessa viidestä. Koesauvojen pinta tuntui ja näytti kiiltävämmältä ja kovemmalta kuin muista materiaaleista valmistettujen koesauvojen pinnat.

Kahden kytKentäainetta sisältävän materiaalin olisi voinut odottaa kestäväen parhaiten taivutusjännitystä. KytKentäaineen vaikutus tuloksiin oli kuitenkin vähäinen: kaikkien kolmen materiaalin taivutuslujuus oli lähes sama, ja pelkkää kalvoa ja paperia sisältävä koemateriaali osoittautui jopa hieman kestävämmäksi kuin toinen kytKentäainetta sisältävä materiaali. Tietenkin on mahdollista, että kytKentäaine ei ole sekoittunut tasaisesti, koska komponentit sekoitettiin käsin granulaa-tia valmistettaessa.

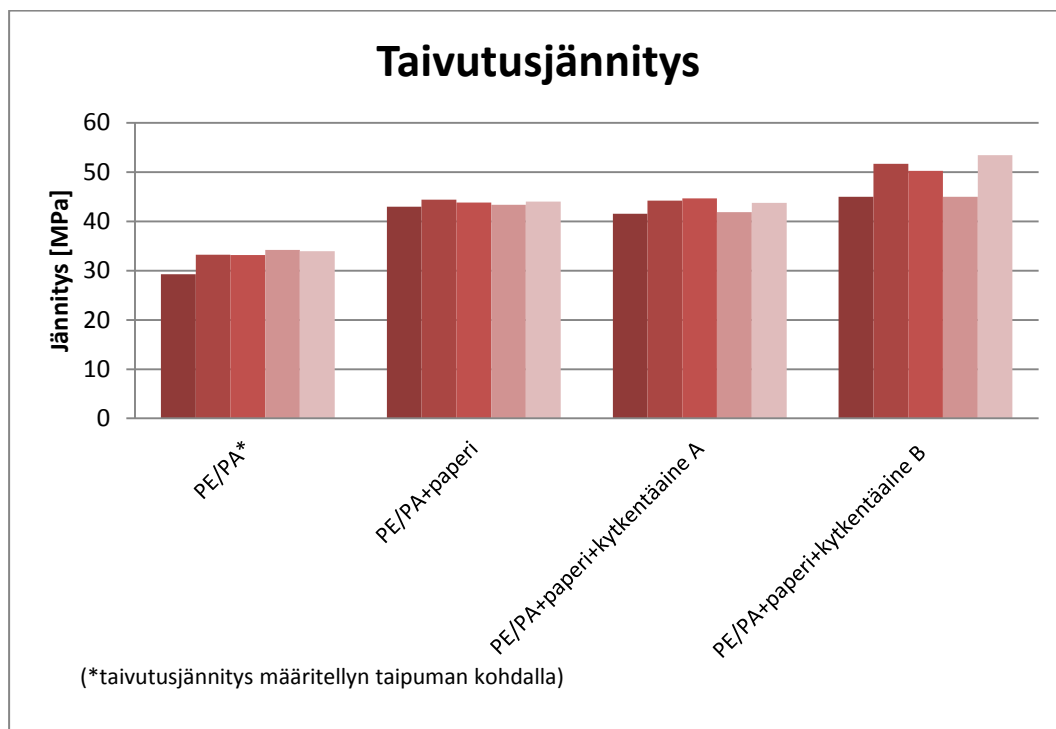
Kimmomoduuli ilmoittaa kappaleen jännityksen suhteen sen aiheuttamaan suhteelliseen venymään. Suurin taivutuskimmomoduuli oli kalvoa ja paperia sisältävällä koemateriaalilla (kuvio 11).



KUVIO 11. Koemateriaaleille lasketut taivutuskimmomoduulit

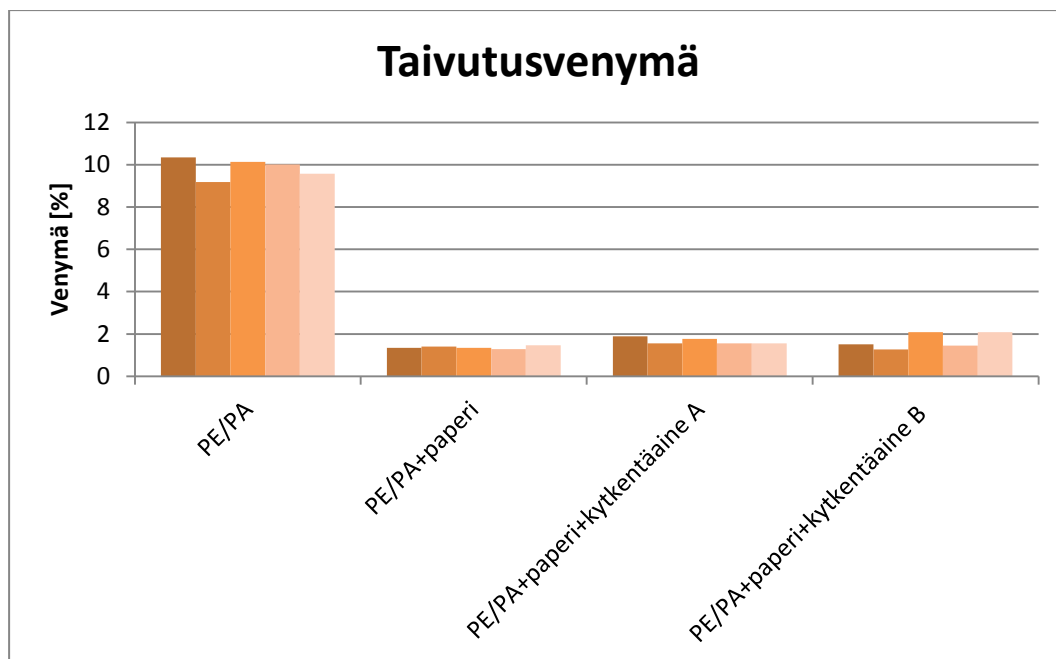
Suurimman taivutusjännityksen kesti kytKentäainetta B sisältävä koemateriaali. On otettava huomioon, että tämän materiaalin tuloksissa oli eniten hajontaa, mikä

saattoi johtua aiemmin mainitusta luistamisesta kokeessa. Kaikenkaikkiaan taivutuslujuus oli kaikilla paperia sisältävillä koesauvoilla hyvin lähellä toisiaan. Mittausten keskiarvoja vertaamalla huomataan, että tulokset kalvoa ja paperia sisältävällä materiaalilla sekä kalvoa, paperia ja kytkentäainetta A sisältävällä materiaalilla ovat lähes samat. Kytkentäainetta B sisältävän materiaalin keskimääräinen taivutuslujuus on 5 MPa suurempi kuin muilla paperia sisältävillä materiaaleilla.



KUVIO 12. Koemateriaaleille mitatut suurimmat taivutusjännitykset

Taivutusvenymästä piirretystä kaaviosta (kuvio 13) huomataan selvästi hauraan ja sitkeän materiaalin ero. Pelkkää kalvoa sisältävät koesauvat olisivat taipuneet kokeessa enemmän kuin tuen ja painimien välissä olisi mahtunut. Kaaviossa olevat venymän arvot on siis laskettu kalvomateriaalin osalta vain kokeen ajalta ja ovat esillä lähinnä antamassa vertailukohdan paperia sisältäville materiaaleille. Näistä mikään ei taipunut käytännössä ollenkaan. Kytkentäaineen kanssa tuloksiin saatiin enimmillään vajaa millimetri lisää taipumaa; prosenteissa noin 0,03 prosenttiyksikköä lisää venymää. Kytkentäainetta B sisältävä materiaali taipui eniten paperia sisältävistä materiaaleista.



KUVIO 13. Koemateriaaleille lasketut taivutusvenymän arvot koko taivutuskokeen ajalta

4.7 Mikroskopia

4.7.1 Periaate

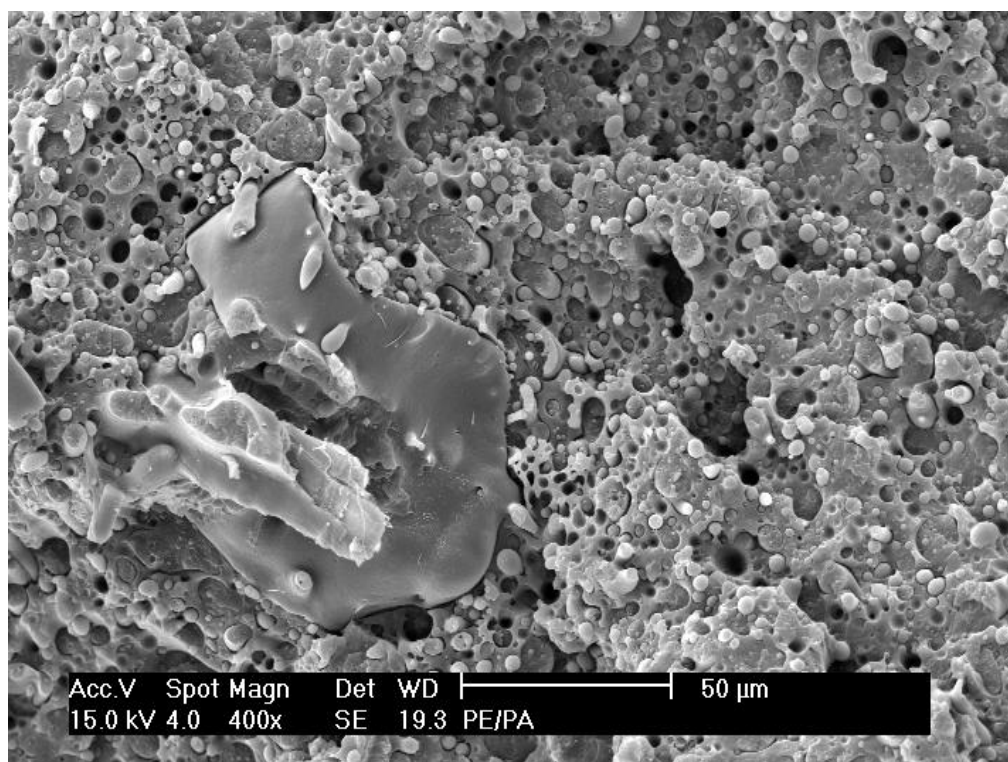
Mikroskoopilla voidaan tutkia materiaalin yksityiskohtia, kuten geometrisiä ominaisuuksia, aineen koostumusta tai rajapintoja (Järvelä & Heikkinen 2009). Mikroskoopilla nähtäviin tuloksiin vaikuttavat paitsi mikroskoopin tarkkuus myös näytteen valmistus. Yleensä mikroskooppisen tutkimuksen aluksi koekappaletta tarkastellaan silmämääräisesti, minkä jälkeen näytettä tutkitaan optisella mikroskoopilla. Näillä kahdella saadaan useimmissa tapauksissa haluttu informaatio. Jos näytettä halutaan tutkia vielä tarkemmin, on käytettävä elektronimikroskooppia. (Jönkkäri 2004, 82.)

Optisella mikroskoopilla nähdään aineen geometrinen rakenne, kuten monikerrosrakenteiden kerrosten paksuudet ja niiden vaihtelut. Täytettyjen tai lujitettujen muovien täyteaineiden jakautuminen, kuitujen orientaatio, muoto ja määrä nähdään optisella mikroskoopilla. Elektronimikroskoopin avulla voidaan tutkia tar-

kemmin näytteen pinnan ominaisuuksia, kuten kiiltoa, mahdollisia säröjä ja adheesiota. Huokoisista materiaaleista nähdään huokosten tarkasti huokosten muoto, pitoisuus ja jakauma. Väriainepigmentit ja niiden jakautuminen sekä muoto näkyvät elektronimikroskoopilla hyvin. Elektronimikroskoopilla voidaan tutkia samoja asioita kuin optisella mikroskoopillakin, tulokset vain ovat tarkempia. (Jönkkäri 2004, 84.) Elektronimikroskoopilla on paras erotuskyky ja syvyystarkkuus. Erotuskyky tarkoittaa pienintä etäisyyttä kahden toisistaan erotettavan pisteen välillä. Syvyystarkkuus on matka, joka saadaan tarkaksi kerralla. Kolmas mikroskoopin tarkkuutta määrittelevä parametri on suurennos. (Jönkkäri 2004, 82.)

4.7.2 Tulokset

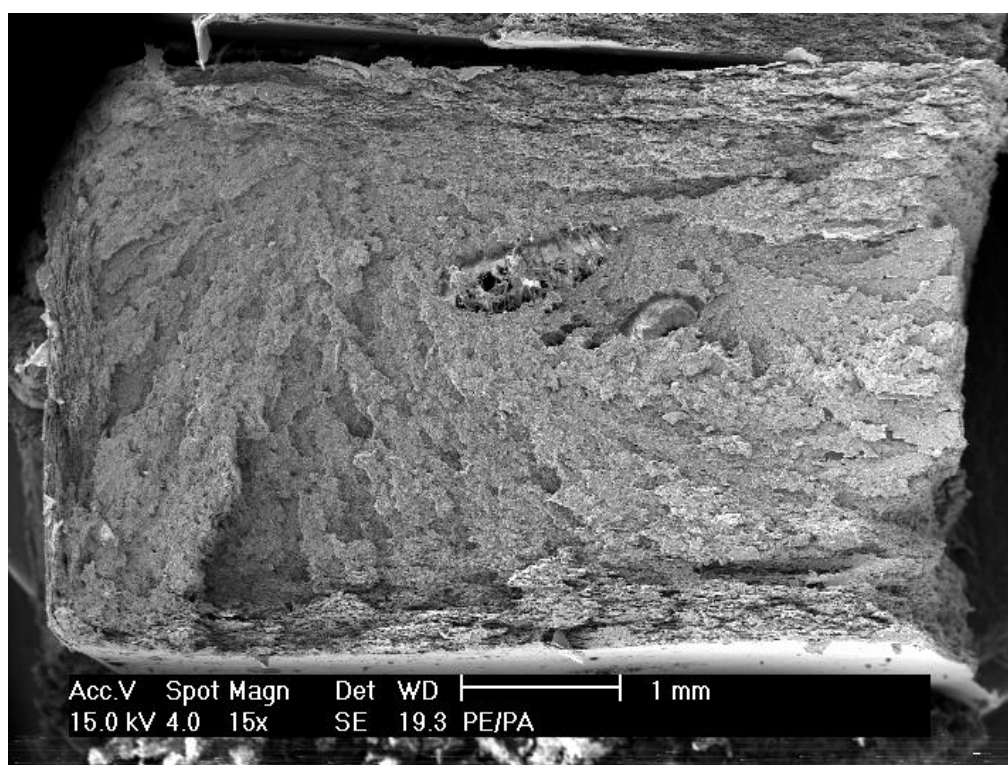
Iskukoekappaleiden murtopintoja tutkittiin pyyhkäiselektronimikroskoopilla. SEM-kuvat otettiin PE/PA-materiaalista pakastetuista koekappaleista, koska loveamattomat huoneenlämpöiset koekappaleet eivät menneet poikki kokeissa. Komposiittimateriaaleissa kuvat ovat loveamattomista huoneenlämpöisistä sauvoista.



KUVA 7. 400x suurennos kalvosta valmistetusta koemateriaalista

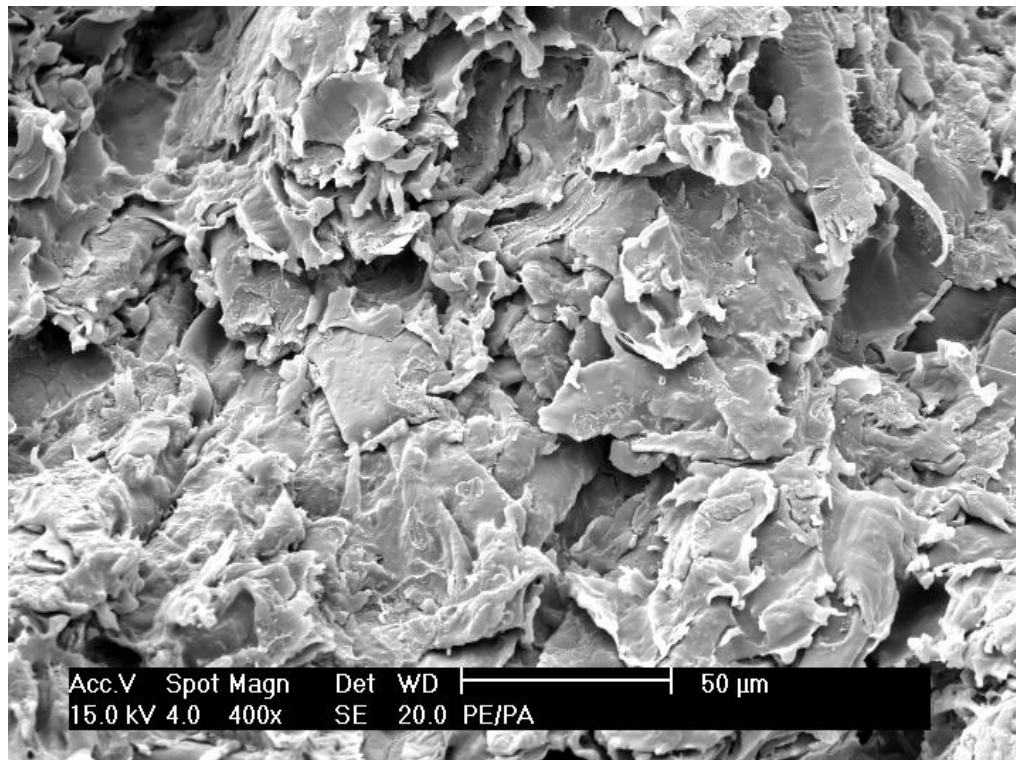
Kuvassa 7 nähdään pelkästä PE/PA-kalvosta valmistetun materiaalin rakennetta. Polyamidi ei sulanut koemateriaalin valmistuksessa, joten polymeerit erottuvat selvästi toisistaan. Polyamidi on jakautunut polyeteenin joukkoon melko tasaisesti lukuunottamatta yhtä huomattavasti suurempaa aluetta. Pienet polyamidikeskittymät ovat kooltaan noin 5–10 µm. Sauvan katketessa materiaalit ovat irronneet toisistaan. Pinnan kuopat eivät varmaankaan ole kosteuden aiheuttamia huokosia. Niissä on ollut polyamidia, joka on irronnut polyeteenistä siististi reunojaan myöten. Suurin polyamidikeskittymä näyttää murtuneen iskukokeessa.

Kuvassa 8 on PE/PA-koesauvan poikkileikkaus, jossa näkyy ontto kohta materiaallissa. Tällainen kohta on voinut syntyä ruiskuvalussa, jos muottiin ei ole saatu puristettua riittävästi materiaalia.

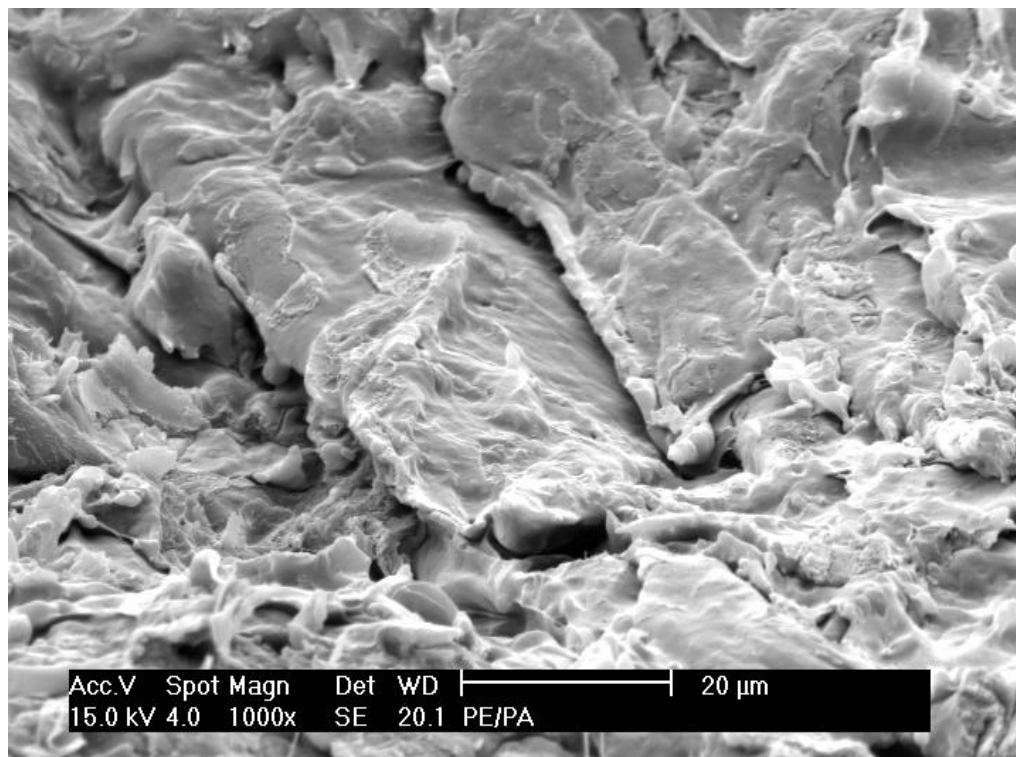


KUVA 8. Iskukoeappaleen koko murtopinta (PE/PA)

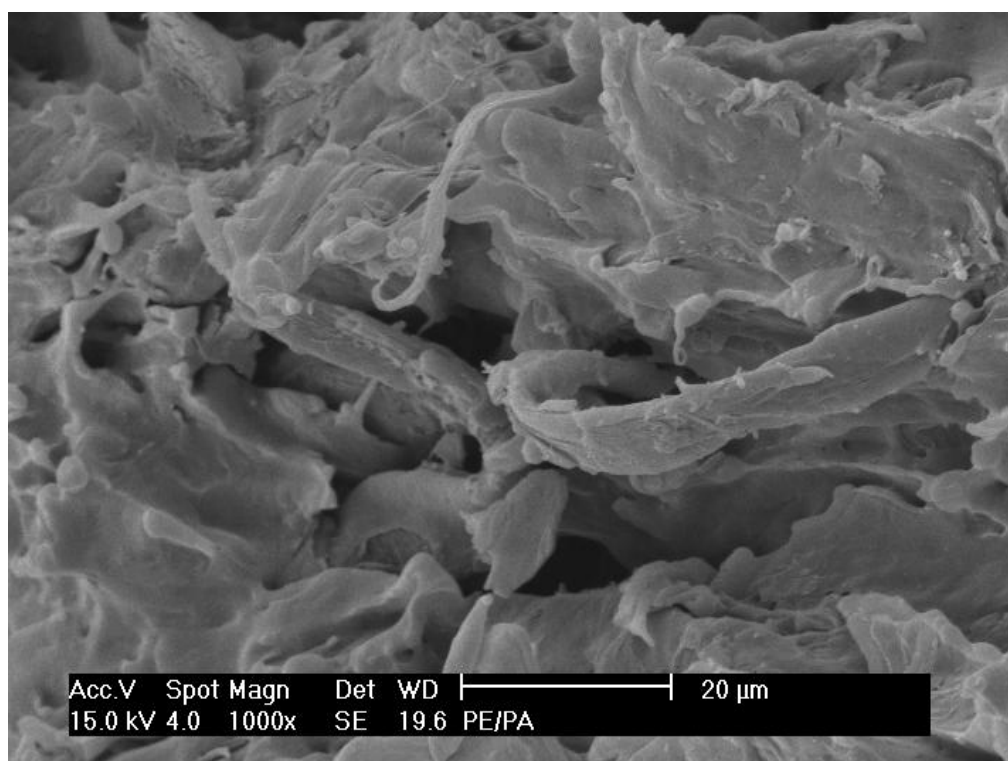
Kalvoa ja paperia sisältävän komposiitin murtopinnan suurennoksessa ei enää näy niin selvästi muovien rajapintoja (kuva 9). Pinta näyttää koostuvan lastuista.



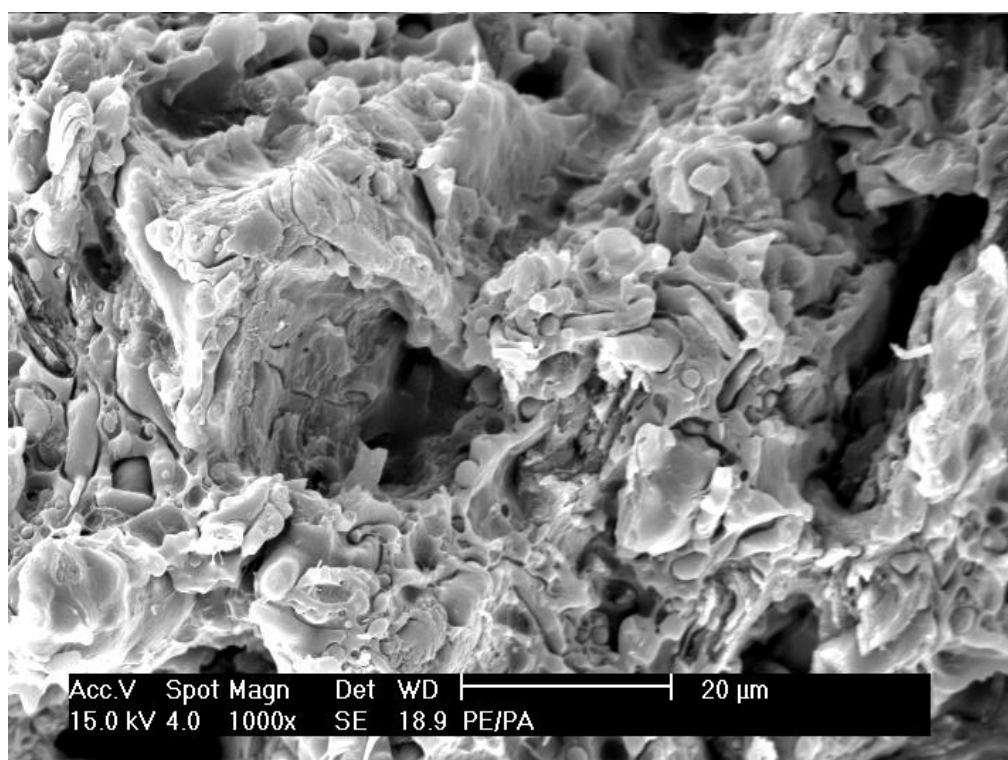
KUVA 9. 400x suurennos kalvoa ja paperia sisältävästä koemateriaalista



KUVA 10. 1000x suurennos kalvoa ja paperia sisältävästä koemateriaalista



KUVA 11. 1000x suurennos kalvoa, paperia ja kytkentäainetta A sisältävästä koemateriaalista



KUVA 12. 1000x suurennos kalvoa, paperia ja kytkentäainetta B sisältävästä koemateriaalista

Kaikkien puumuovikomposiittien pintojen 1000-kertaisista suurennoksista voidaan tarkastella kytKentäaineiden vaikutuksia. Ilman kytKentäainetta pinta näyttää koostuvan suurista liuskoista (kuva 10). KytKentäaineella A liuskojen muoto ja reunat näyttävät pehmeämmiltä (kuva 11). KytKentäainetta B sisältävästä koekappaleesta saatiin kahteen muuhun puumuovimateriaaliin verrattuna kovin erilainen kuva (kuva 12). Tässä materiaalissa rakenne ei vaikuta enää liuskoittuneelta.

5 YHTEENVETO

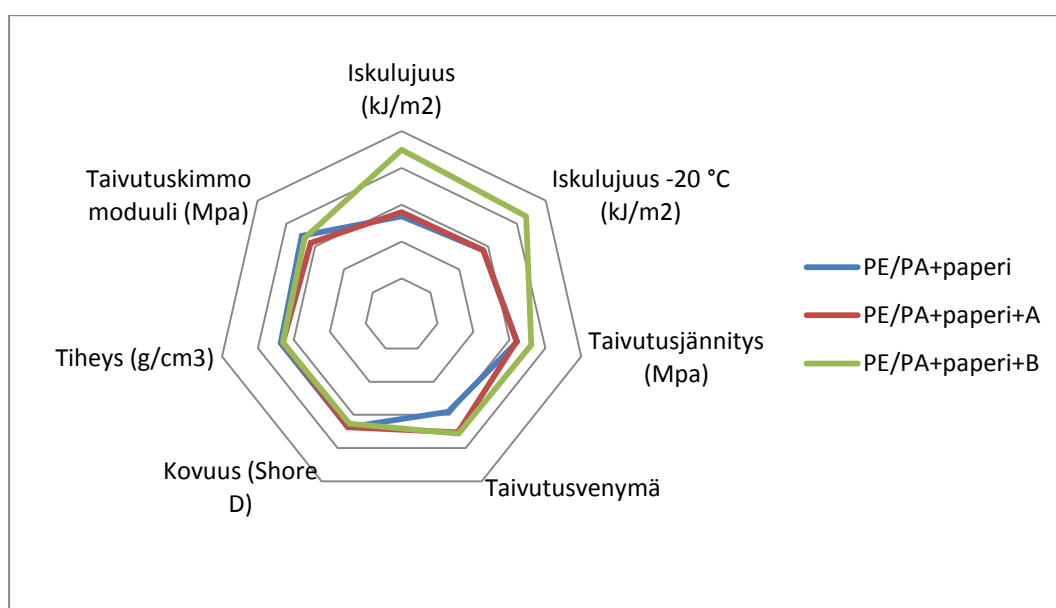
Tässä työssä valmistettiin puumuovikomposiittia, jossa puukuitu oli paperia ja matriisimuovi polyeteeniä ja polyamidia sisältävää monikerroskalvoa. Molemmat materiaalit olivat niitä valmistavien tehtaiden tuotannon sivuvirtana syntyvää jätettä. Komposiitissa käytetyn kalvon ja paperin käyttökelpoisin vaihtoehtoinen kierrätysmenetelmä on energiahyötykäyttö, joten onnistuessaan näistä materiaaleista valmistettu komposiitti tuo molempien tuotteiden elinkaareen uuden vaiheen ennen niiden hävittämistä.

Mielenkiintoiseksi tämän puumuovikomposiitin valmistamisen teki monikerroskalvossa oleva polyamidi. Polyamidin käyttö puumuovikomposiitissa on harvinaista. Vaikka polyamideja on olemassa monia tyyppejä, lähes kaikkien sulamislämpötila ylittää 200 °C. Tätä lämpötilaa voidaan pitää rajana puukuidun prosessoinnissa. Puukuitu hajoaa (eli palaa) viimeistään 220 °C:ssa, mutta mitä alemmaa lämpötilaa komposiitin valmistuksessa voidaan käyttää, sitä paremmin sen ominaisuudet säilyvät. Tässäkään komposiitissa polyaimidia ei voitu kokonaan sulattaa, joten se toimi materiaalissa lujitteen ominaisuudessa.

Komposiitista oli kolme versiota: yksi ilman kytkentäainetta ja kaksi eri kytkentäaineilla. Neljäs koemateriaali sisälsi pelkkää kalvoa, jotta voitiin tutkia paperin lisäämisen vaikutuksia matriisimuoviin. Näistä materiaaleista valmistettiin ekstruuderilla granulaattia ja ruiskuvalmalla koesauvoja. Tutkimussuunnitelma sisälsi paljon kokeita. Mekaanisista testeistä koemateriaaleille tehtiin taivutuskokeet, iskukokeet ja kovuusmittaukset. Lisäksi mitattiin sulaindeksiä, määritettiin tiheys ja tutkittiin termisiä ominaisuuksia DSC:lla.

Kalvosta tehty granulaatti oli hauraan ja huokoisen näköistä, mikä saattoi johtua kosteasta materiaalista. Ennen ruiskuvalua materiaalit kuivattiin, ja koesauvat näyttivät jo silmämääräisesti laadukkaammilta. Yhdistelmämuovi osoittautui sitkeäksi ja taipuisaksi materiaaliksi. Iskusitkeys tosin väheni huomattavasti, kun testattiin pakastettuja sauvoja. Sulaindeksin mittauksessa materiaali valui juuri ja juuri suuttimesta ulos, joten juoksevaa se ei ollut. Tämän saattoi toisaalta huomata jo granulaatin valmistuksessa.

Paperin lisääminen yhdistelmämuoviin muutti ominaisuuksia huomattavasti. Toisin kuin pelkkää muovia sisältävät koekappaleet, komposiittikoekappaleet katkesivat huoneenlämpöisinäkin iskukokeissa. Paperia sisältävien sauvojen tapauksessa koekappaleiden pakastaminen ei muuttanut tuloksia lähes ollenkaan. Taivutuskokeissa komposiitit taipuivat todella vähän ja sen jälkeen menivät poikki. Komposiitille ei saatu edes mitattua sulaindeksiä, koska paperi sekoitettuna jo muuten heikosti juoksevaan muoviin ei tullut suuttimesta läpi ollenkaan. Paperia sisältävät materiaalit olivat hieman tiheämpiä ja pinnaltaan kovempia kuin pelkkää muovia sisältävä materiaali.



KUVIO 9. Komposiittien ominaisuuksia

Kytkeäaineiden lisääminen komposiittiin paransi jonkin verran mekaanisia ominaisuuksia (kuvio 9). Iskulujuuksia mitattaessa kappaleen murtumiseen tarvittiin enemmän voimaa, myös taivutuslujuus parani. Kuitenkaan kytkeäaineilla saadut tulokset eivät olleet ehkä niin hyvät kuin olisi saattanut odottaa. Kaikkien komposiittien (myös kytkeäaineettoman) tulokset olivat lähes joka kokeessa ja mittauksessa hyvin lähellä toisiaan. Esimerkiksi taivutuslujuus parani parhaimmillaan 5 MPa. Lähdekirjallisuudessa olleissa tutkimuksissa kytkeäainetta käyttämällä on saatu paljon suurempia eroja verrattuna kytkeäaineettomaan komposiittiin. Tietenkin niissä käytettiin aivan eri materiaaleja, joten tulokset eivät ole sellaisinaan vertailukelpoisia. Kytkeäaineella B saatiin komposiiteista parhaimmat tulokset.

Kaikenkaikkiaan komposiitista tuli mielestäni käyttökelpoista. Tällaiselle materiaalille paras valmistusmenetelmä olisi varmaankin profiiliekstruusio. Valmistusmenetelmän on oltava sellainen, ettei massaa tarvitse puristaa läpi pienistä aukoista. Ruiskuvalumateriaaliksi tms. en tätä suosittelisi olemattoman sulaindeksin vuoksi.

Monikerroskalvojätettä voidaan kierrättää ja käyttää puumuovikomposiitissa. Ainakin tätä nimenomaista PE/PA-kalvoa voidaan. Monikerroskalvojen rakenne ja materiaalit vaihtelevat niin paljon, että tätä tutkimusta ei voida yleistää koskemaan muita kuin tätä kalvoa. Todennäköisesti myöskään käytettäessä jotakin muuta PE/PA-kalvoa ei saataisi samanlaisia tuloksia.

LÄHTEET

- Ashori, A. & Nourbakhsh, A. 2009. Characteristics of wood–fiber plastic composites made of recycled materials. *Waste Management* 4/2009, 1291–1295.
- Breil, J. 2009. Multilayer oriented films. Teoksessa Wagner, J. (toim.) *Multilayer Flexible Packaging*. Elsevier Inc, 231–237.
- Butler, T. & Morris, B. 2009. PE Based multilayer film structures. Teoksessa Wagner, J. (toim.) *Multilayer Flexible Packaging*. Elsevier Inc, 205–230.
- Caulfield, D., Clemons, C., Jacobson, R., & Rowell, R. 2005. Wood Thermoplastics Composites. Teoksessa Rowell, R. (toim.) *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Taylor & Francis, 1–14.
- Cui, Y., Lee, S., Noruziaan, B., Cheung, M. & Tao, J. 2007. Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 4/2008, 665–661.
- Goodship, V. 2007. *Introduction to plastics recycling*. Shrewsbury (Iso-Britannia): Smithers Rapra.
- Helsingin yliopisto. 2005. Muovien kierrätys. Kemia yhteiskunnassa - opetuspaketti [viitattu 15.3 2012]. Saatavissa: <http://www.helsinki.fi/kemia/opettaja/aineistot/muovit2/kierratys/index.htm>
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. 2008. Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical transactions of the royal society B* 7/2009, 2115–2126.
- Järvelä, P. & Heikkinen, R. 2009. *Muovitekniikan laboraatiot. Kurssimateriaali*. Lahden ammattikorkeakoulu, Tekniikan ala.

Jätelaitosyhdistys. 2011. Sekajäte [viitattu 15.12.2011]. Saatavissa:
http://www.kierratys.info/laji_sekajate.php

Jönkkäri, I. 2004. Polymeerien testaus-, ja tutkimusmenetelmät. Teoksessa Kylmä, M. (toim.) Muovialan perustietoutta. Tampereen teknillinen yliopisto, 68–87.

Kaukonen, J. 1994. Termoanalyysi (DSC ja TG). Julkaisussa Pirttimäki, J., Saarnivaara, K. Laine, E. j& Kalsta, K. Fysikaalisen farmasian mitausmenetelmät. Turun yliopisto, 13–27 [viitattu 25.3.2012]. Saatavissa:
http://www.fysikaalinenfarmasia.fi/pdf/polymorfi1994_Fysikaalisen_farmasian_mittausmenetelmat_I.pdf

Koto, T. & Tiisala, S. 2004. Muovi+puu, puukuitulujitteiset muovikomposiitit. Jyväskylä: Gummerus.

Kuluttajavirasto. 2011. Muovien laatu selviää merkinnästä [viitattu 13.12.2011]. Saatavissa: <http://www.kuluttajavirasto.fi/fi-FI/eko-ostaja/ymparistomerkit/muovien-merkinnat/>

Muoke. 2011. Muovimuotoilu: Valtamuovit [viitattu 15.12.2011]. Saatavissa: <http://www.muovimuotoilu.fi/content/view/32/63/>

Muoviteollisuus ry. 2012. FAQ [viitattu 20.3.2012]. Saatavissa: http://www.luemuovia.net/fin/usein_kysyttya/?Cat=5

Packaging Films. 2011. Coextruded Films [viitattu 15.2.2012]. Saatavissa: <http://www.packaging-films.com/coextruded-films.html>

Pakkausalan ympäristörekisteri PYR Oy. 2011. Mitä on pakkausten hyötykäyttö? [viitattu 13.12.2011]. Saatavissa: <http://www.pyr.fi/hyotykaytto.html>

- Parjanen, J., & Andersson, M. 2009. Luonnonkuitukomposiittien tarveselvitys [viitattu 29.3.2012]. Saatavissa: http://www.ketek.fi/oske/Luonnonkuitukomposiittien_tarveselvitys_Loppuraportti_julkinen.pdf
- Poikelispää, M. 2004. Polymeerit ja niiden lisäaineet. Teoksessa Kylmälä, M. (toim.) Muovialan perustietoutta. Tampereen teknillinen yliopisto, 23–31.
- Seppälä, J. 2005. Polymeeriteknologian perusteet. 5. tarkastettu ja korjattu painos. Helsinki: Otatieto.
- Tartakowski, Z. 2010. Recycling of packaging multilayer films: New materials for technical products. Julkaisussa Worrel, E. (toim.) Resources, Conservation and Recycling. Elsevier Inc, 167–170.
- VTT. 2003. Puu-muovi-yhdistelmillä voi korvata kyllästetyn puun [viitattu 14.1.2012]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/newsarchive/2003/uutinen513.htm>
- Wipak Oy. 2011. Medical Packaging [viitattu 10.12.2011]. Saatavissa: http://www.wipak.com/medical/en_GB/medical/

LIITTEET

LIITE 1	Ajoarvot
LIITE 2	Sulaindeksin tulokset
LIITE 3	Iskukokeiden tulokset
LIITE 4	DSC:n tulokset
LIITE 5	Ominaispainomittausten tulokset
LIITE 6	Kovuusmittausten tulokset
LIITE 7	Taivutuskokeen tulokset

Sekoituksen ajoarvot

Vyöhykkeiden lämpötilat (°C)

	PE/PA	PE/PA+paperi	PE/PA+paperi+kytkentäaineet
1	200	200	200
2	210	210	210
3	210	205	210
4	205	200	205
5	200	190	200
6	200	190	200
7	190	185	190
8	190	170	190
9	180	180	180
10	180	180	180
Massan lämpötila (°C)	205	192	205
Paine (bar)	n.35	n.55	70–80
Momentti (Nm)	75-150	150-200	200–225
Ruuvien nopeus (1/min)	100		

Ruiskuvalun ajoarvot

Ruiskuvalukone:		Krauss	työnsuorittaja: TL, TM
aika:		24.11.2011	
paikka:		poly	
muottitiedot:		2-pesä	
materiaali:		PEPA	
ruiskutusnopeus:	(mm/s)	100	
ruiskutuspaine	(bar)	528	
jälkipaine	(bar)	400	
jäähdytysaika	(s)	15	
jälkipaineaika	(s)	10	
annostusnopeus	(rpm)	200	
vastapaine	(bar)	50	
sylinterilämmöt	1.(C)	250	
	2.	245	
	3.	240	
	4.	235	
huomautukset,kommentit:	Kuivaus Somos yön yli 60 C		
PE/PA			

sarjan nimike:	PE-PA +50% paperia (kytkentäaine A/B tai ilman)		työnsuorittaja: LM
Ruiskuvalukone:		Krauss-Maffei	
aika:		23.12.2011	
paikka:		Poly	
muottitiedot:		2-pesä	
materiaali:		PE-PA + Paperi	
koesarja:			
ruiskutusnopeus:	(mm/s)	80	
ruiskutuspaine	(bar)	1100	
painneenvaihto	hydr.(bar)		
	matka(mm)	12	
jälkipaine	(bar)	300	
jäähdytysaika	(s)	10	
jälkipaineaika	(s)	4	
annostusmatka	(mm)	85	
annostusnopeus	(rpm)	200	
vastapaine	(bar)	30	
tyyny(mitattu)	(mm)	8	
sylinterilämmöt	1.(C)	250	
	2.	230	
	3.	215	
	4.	200	
muottilämpötilat	etumuotti	40	
	takamuotti	40	
huomautukset,kommentit:	Holvaa syöttöaukkoon, pa- laa helposti, kuivattu 4h 60°C		

Komposiittimateriaalit

Sulaindeksin tulokset

PE/PA	
1	0.14g
2	0.15g
3	0.13g
4	0.15g
5	0.17g
ka	0,148g

$$MFR (240, 5) = \frac{600 \cdot 0,148}{240} = 0,37g/10min$$

Iskukokeiden tulokset

Test no	PE/PA Impact Strength (kJ/m ²)	PE/PA -20 C Impact Strength (kJ/m ²)
1	92,28	76,26
2	88,95	70,98
3	120,61	74,28
4	112,26	55,25
5	101,82	38,67
6	126,17	71,55
7		61,22
8		62,03
9		64,89
10		68,14
Average	107,02	64,33
Median	107,04	66,51
Minimum	88,95	38,67
Maximum	126,17	76,26
Coef. of Var.	14,17	17,25
Std. Dev.	15,16	11,10

Test no	PE/PA+paperi Impact Strength (kJ/m ²)	PE/PA+paperi -20 C Impact Strength (kJ/m ²)
1	7,25	7,34
2	7,69	8,07
3	7,04	8,02
4	7,30	8,12
5	6,88	7,48
6	7,89	7,72
7	6,86	7,93
8	7,69	8,04
9	7,41	6,76
10	7,48	7,43
Average	7,35	7,69
Median	7,36	7,83
Minimum	6,86	6,76
Maximum	7,89	8,12
Coef. of Var.	4,78	5,67
Std. Dev.	0,35	0,44

LIITE 3/2

Test no	PE/PA+paperi+kytkentä a Impact Strength (kJ/m ²)	PE/PA+paperi+kytkentä a -20 C Impact Strength (kJ/m ²)
1	7,97	8,41
2	7,32	7,26
3	7,26	7,56
4	8,85	7,64
5	7,05	7,64
6	7,50	7,88
7	6,38	6,99
8	8,69	7,98
9	7,64	7,70
10	6,99	7,58
Average	7,57	7,66
Median	7,41	7,64
Minimum	6,38	6,99
Maximum	8,85	8,41
Coef. of Var.	10,09	5,05
Std. Dev.	0,76	0,39

Test no	PE/PA+paperi+kytkentä b Impact Strength (kJ/m ²)	PE/PA+paperi+kytkentä b -20 C Impact Strength (kJ/m ²)
1	11,54	10,94
2	13,67	11,81
3	12,02	12,07
4	12,36	11,46
5	13,14	11,33
6	10,54	10,40
7	12,35	12,67
8	12,19	11,84
9		13,47
10		10,64
Average	12,22	11,66
Median	12,27	11,63
Minimum	10,54	10,40
Maximum	13,67	13,47
Coef. of Var.	7,77	7,99
Std. Dev.	0,95	0,93

DSC:n tulokset

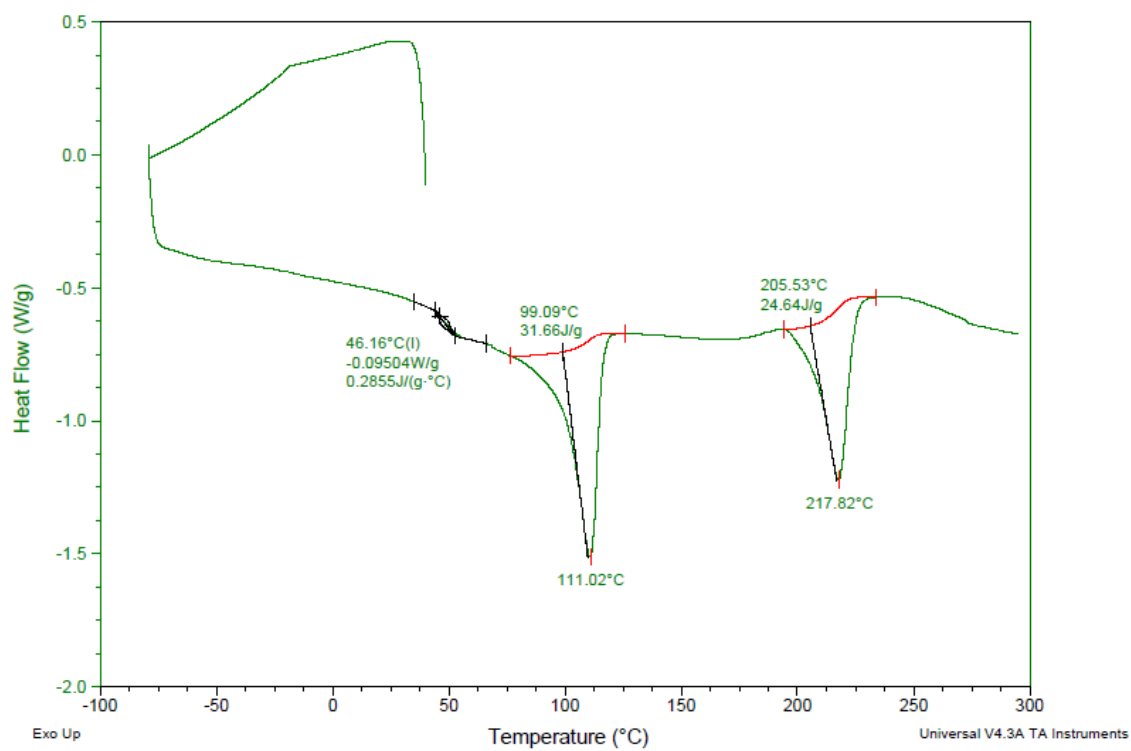
Koemateriaali	Näyte	Sulamispiste PE (°C)	Sulamisväli PE (°C)	Sulamisenergia PE (J/g)
PE/PA	1	111,02	80–121	31,66
	2	111,64	88–117	51,54
PE/PA+paperi	1	110,77	96–119	14,27
	2	110,73	99–119	12,89
PE/PA+paperi+kytkentää. A	1	110,66	97–119	13,33
	2	111,44	99–120	12,77
PE/PA+paperi+kytkentää. B	1	112,22	83–117	19,98
	2	112,43	95–121	20,37
Keskiarvo		111	92–119	

Polyeteeni

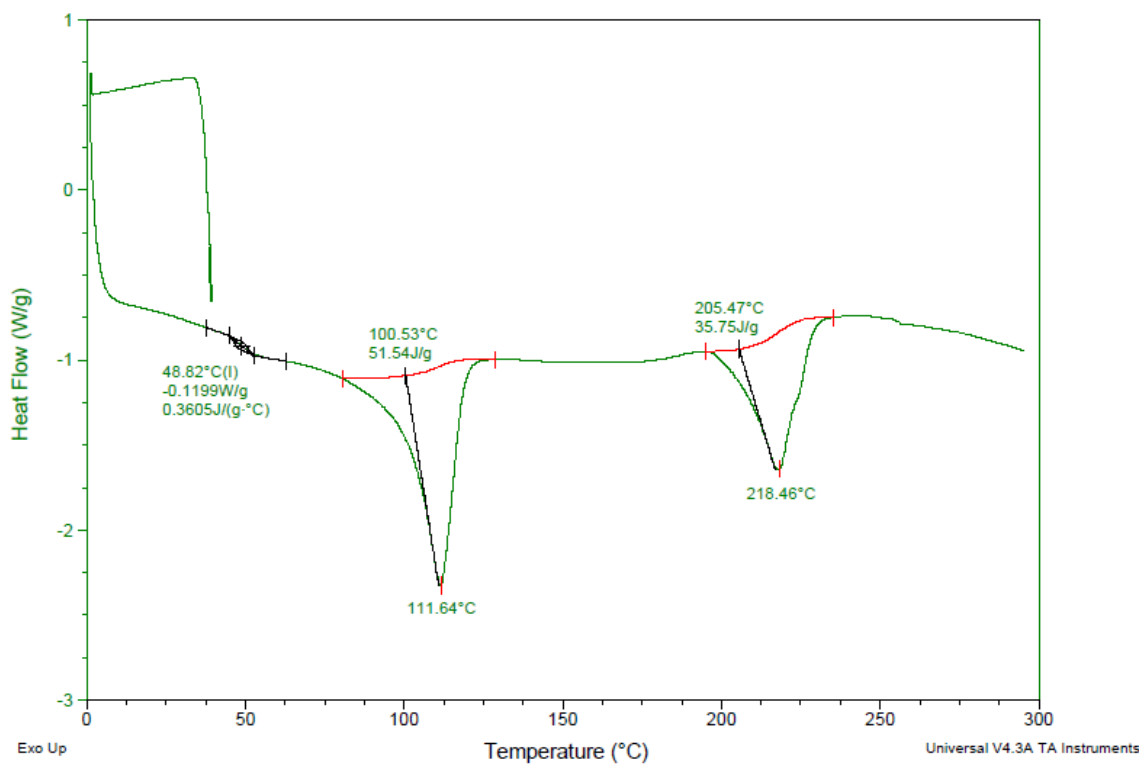
Koemateriaali	Näyte	Sulamispiste PA (°C)	Sulamisväli PA (°C)	Sulamisenergia PA (J/g)
PE/PA	1	217,82	196–231	24,64
	2	218,46	197–230	35,75
PE/PA+paperi	1	218,6	196–226	10,37
	2	218,83	196–225	11,75
PE/PA+paperi+kytkentää. A	1	219,09	200–228	10,62
	2	219,53	199–226	9,691
PE/PA+paperi+kytkentää. B	1	219,69	198–228	9,754
	2	219,35	203–226	8,207
Keskiarvo		219	198–228	

Polyamidi

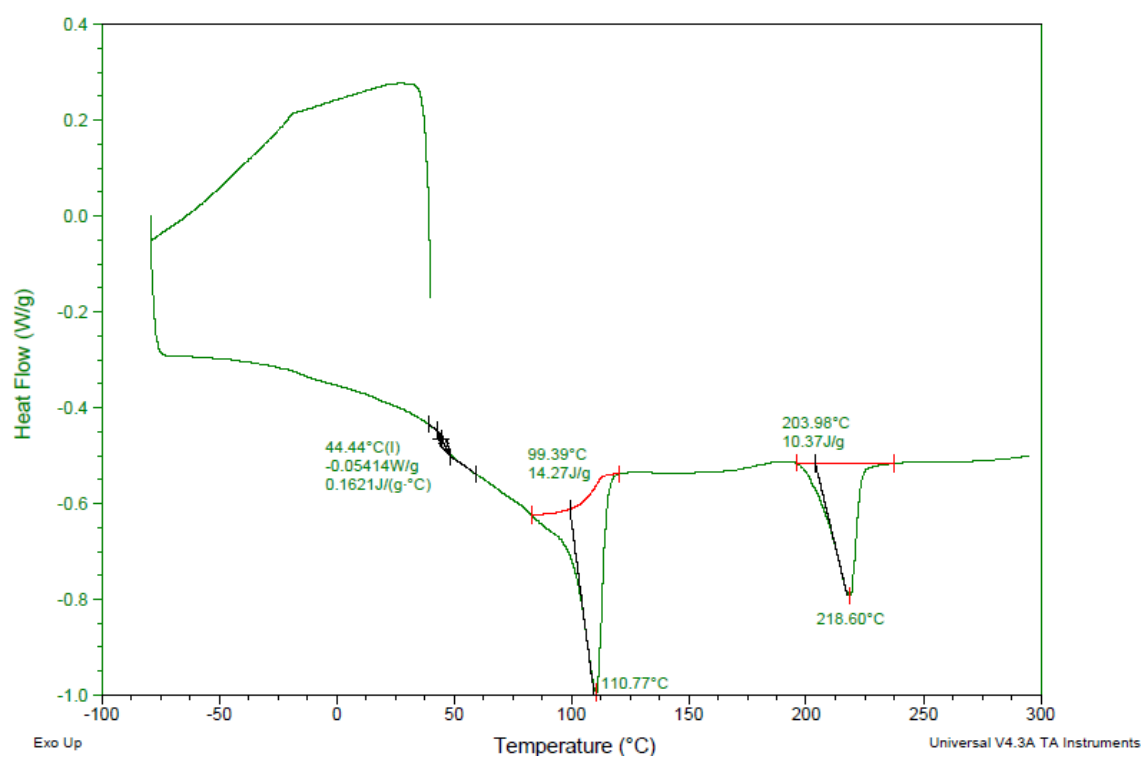
DSC-käyrät



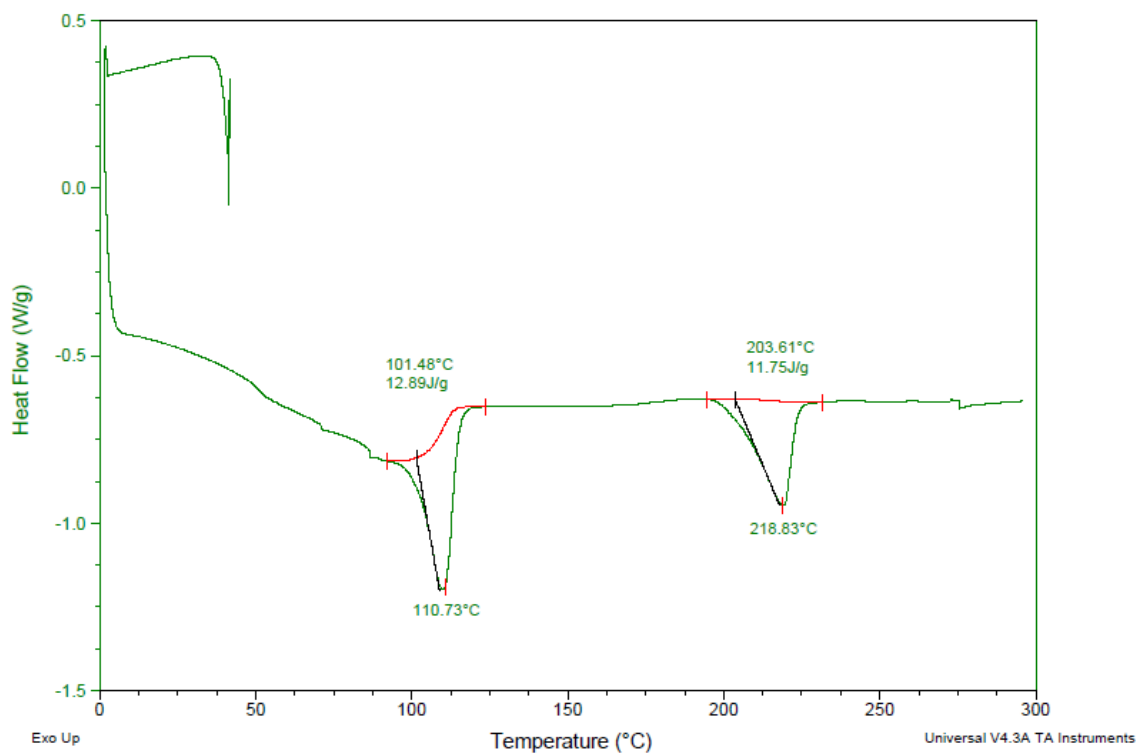
PE/PA, näyte 1 (3,3 mg)



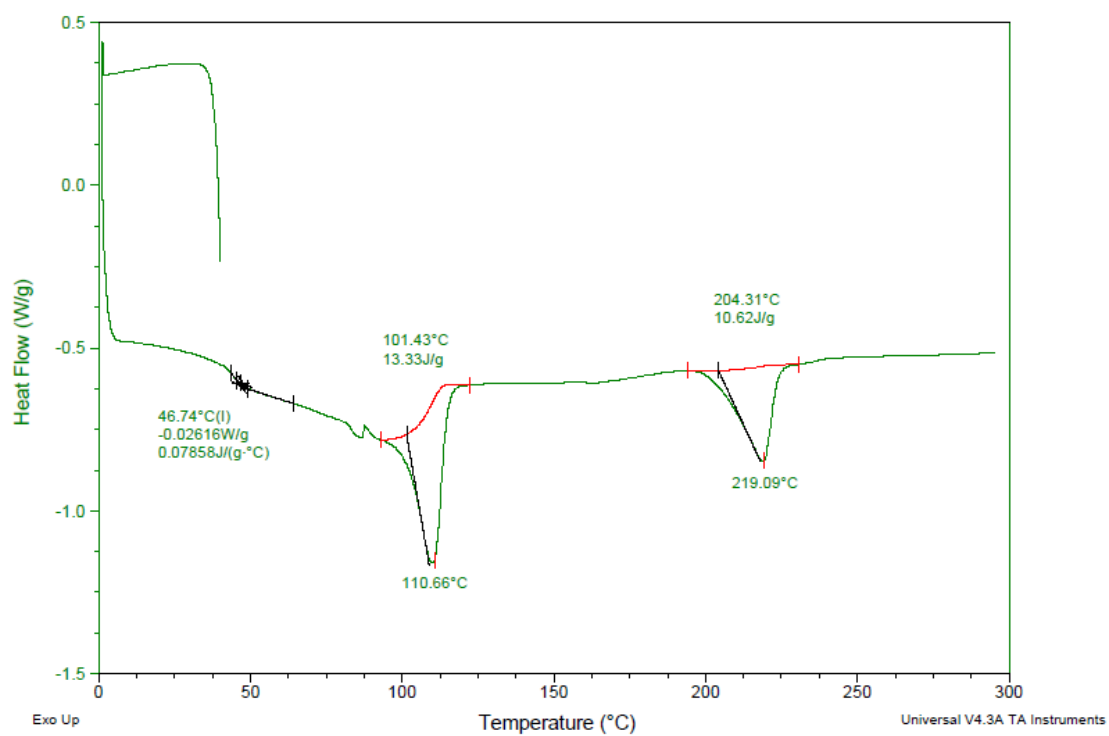
PE/PA, näyte 2 (2,5 mg)



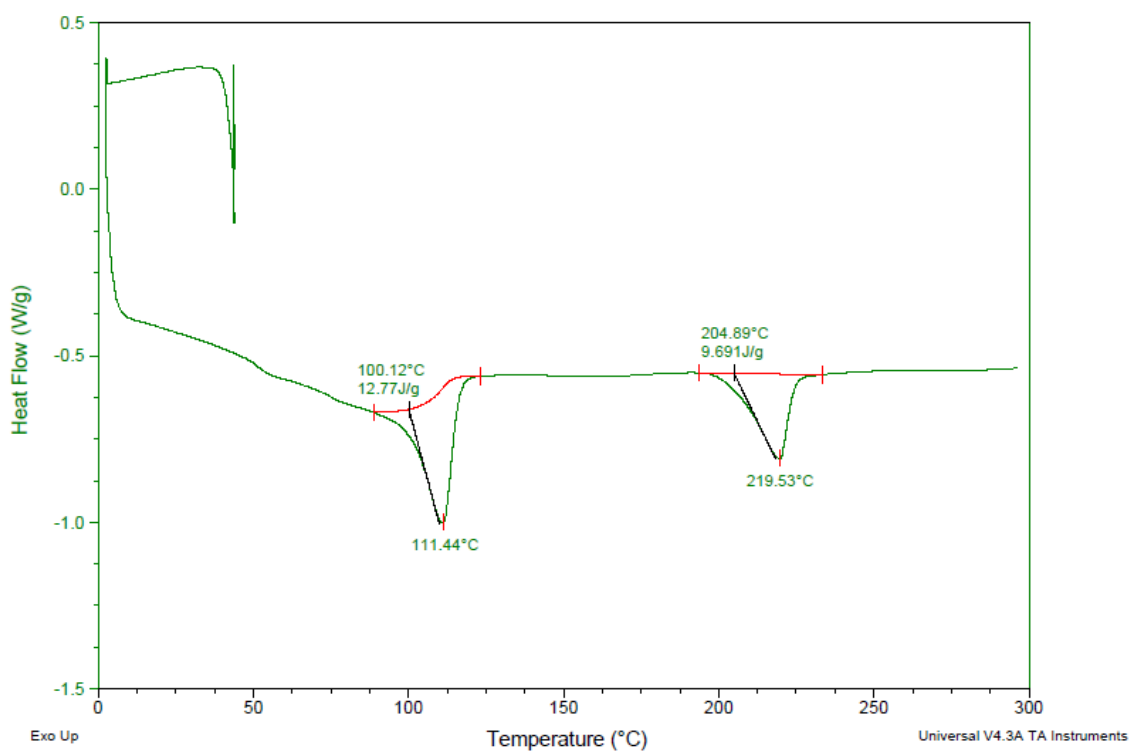
PE/PA+paperi, näyte 1 (3,0 mg)



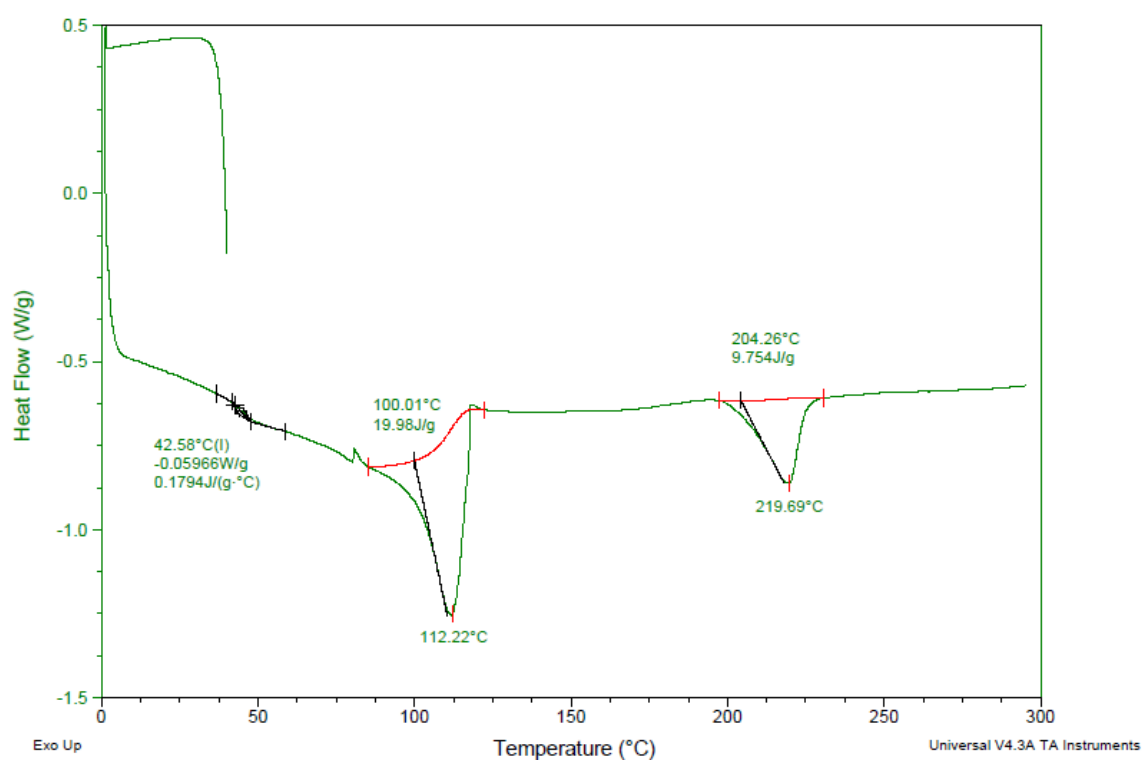
PE/PA+paperi, näyte 2 (3,0 mg)



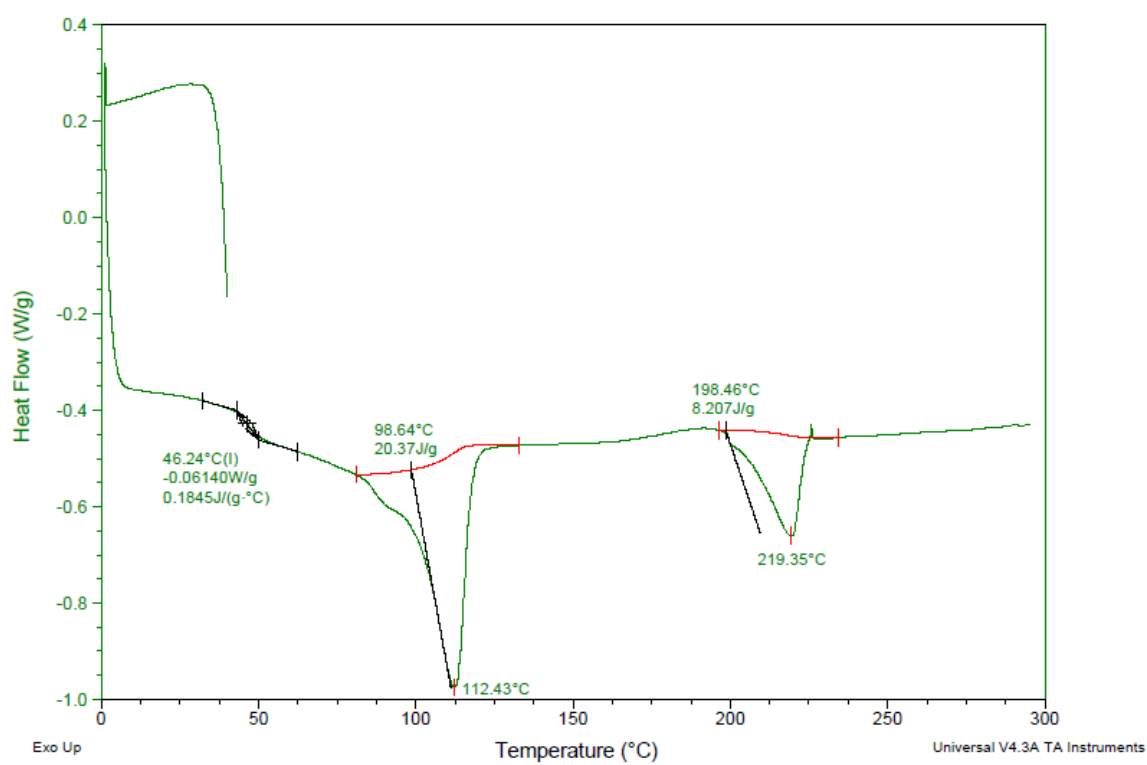
PE/PA+paperi+kykettäaine A, näyte 1 (2,7 mg)



PE/PA+paperi+kykettäaine A, näyte 2 (3,5 mg)



PE/PA+paperi+kykentaaine B, näyte 1 (3,8 mg)



PE/PA+paperi+kykentaaine B, näyte 2 (3,6 mg)

Ominaispainomittausten tulokset

$$\rho = \rho_{\text{neste}} \frac{m_{\text{ilmassa}}}{m_{\text{ilmassa}} - m_{\text{vedessä}}}$$

Laskukaava

PE/PA			
kappale	massa ilmassa (g)	massa vedessä (g)	tiheys (g/cm ³)
1	1,31	0	0,9982
2	1,42	-0,07	0,9513
3	0,81	-0,02	0,9741
4	1,01	-0,05	0,9511
5	1,44	-0,06	0,9587
keskiarvo	1,198	-0,04	0,96668
hajonta	0,27671	0,05831	0,03989

PE/PA+paperi			
kappale	massa ilmassa (g)	massa vedessä (g)	tiheys (g/cm ³)
1	1,24	0,15	1,1355
2	1,81	0,21	1,1292
3	1,37	0,12	1,094
4	1,7	0,21	1,1389
5	0,89	0,09	1,1105
keskiarvo	1,402	0,156	1,12162
hajonta	0,69907	0,10167	0,03588

PE/PA+paperi+kytkentäaine A			
kappale	massa ilmassa (g)	massa vedessä (g)	tiheys (g/cm ³)
1	0,99	0,09	1,098
2	1,58	0,16	1,1107
3	0,91	0,08	1,0944
4	1,66	0,16	1,1047
5	1,76	0,17	1,1049
keskiarvo	1,38	0,132	1,10254
hajonta	0,75528	0,08192	0,01212

PE/PA+paperi+kytkentäaine A

kappale	massa ilmassa (g)	massa vedessä (g)	tiheys (g/cm ³)
1	0,95	0,11	1,1289
2	0,88	0,1	1,1262
3	0,8	0,09	1,1247
4	0,95	0,11	1,1289
5	2,14	0,24	1,1243
keskiarvo	1,144	0,13	1,1266
hajonta	1,06127	0,11755	0,00222

LIITE 6

Kovuusmittausten tulokset

	PE/PA	PE/PA+paperi
1	68	69
	60	68
2	61	70
	60	70
3	60	68
	60	68
4	61	70
	62	69
5	61	68
	62	69
ka.	60,8	68,9
hajonta	0,83	0,88

	PE/PA+paperi+kytkentäaine A	PE/PA+paperi+kytkentäaine B
1	68	69
	70	68
2	70	68
	68	67
3	68	67
	68	67
4	68	66
	67	67
5	69	67
	68	66
ka.	68,4	67,2
hajonta	0,97	0,92

Taivutuskokeiden tulokset

PE/PA					
	taivutusjännitys	taivutusjännitys määritetty (1,5h) (MPa)	taivutus- kimmomoduuli (Mpa)	taipuma (mm)	taivutus- venymä
	max (MPa)				
1	40,9	29,25	1003	19	0,1035
2	39,39	33,19	1011	17	0,09185
3	38,73	33,19	1011	18	0,10131
4	40,06	34,2	1011	18	0,1002
5	38,76	33,95	1052	17	0,0957
keskiarvo	39,57	32,75	1018	18	0,0985
hajonta	0,922	2,010	19,5	0,843	0,005

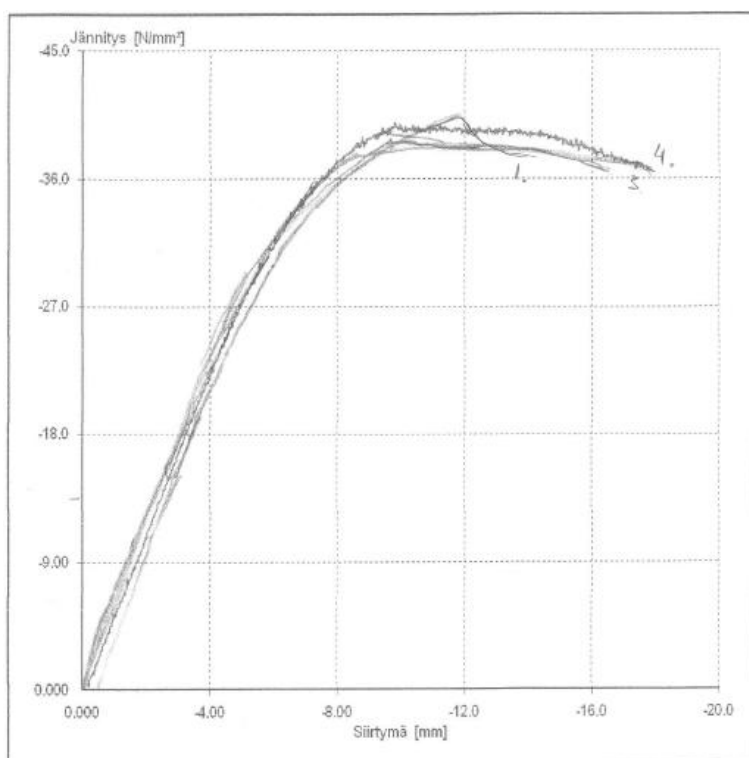
PE/PA+paperi				
	taivutusjännitys	taivutus- kimmomoduuli (MPa)	taipuma (mm)	taivutusvenymä
	max (MPa)			
1	42,98	4146	2,4	0,0135
2	44,39	4146	2,5	0,014
3	43,82	3895	2,4	0,0135
4	43,34	3953	2,3	0,0129
5	44,02	4146	2,6	0,0147
keskiarvo	43,71	4057	2,5	0,0137
hajonta	0,557	123,3	0,123	0,001

PE/PA+paperi+kytkentäaine A				
	taivutusjännitys	taivutus- kimmomoduuli (MPa)	taipuma (mm)	taivutusvenymä
	max (MPa)			
1	41,55	3675	3,0	0,0189
2	44,2	3824	2,8	0,0156
3	44,65	3675	3,2	0,0176
4	41,87	3675	2,8	0,0156
5	43,74	3675	2,8	0,0156
keskiarvo	43,20	3705	2,9	0,0167
hajonta	1,40	66,6	0,178	0,002

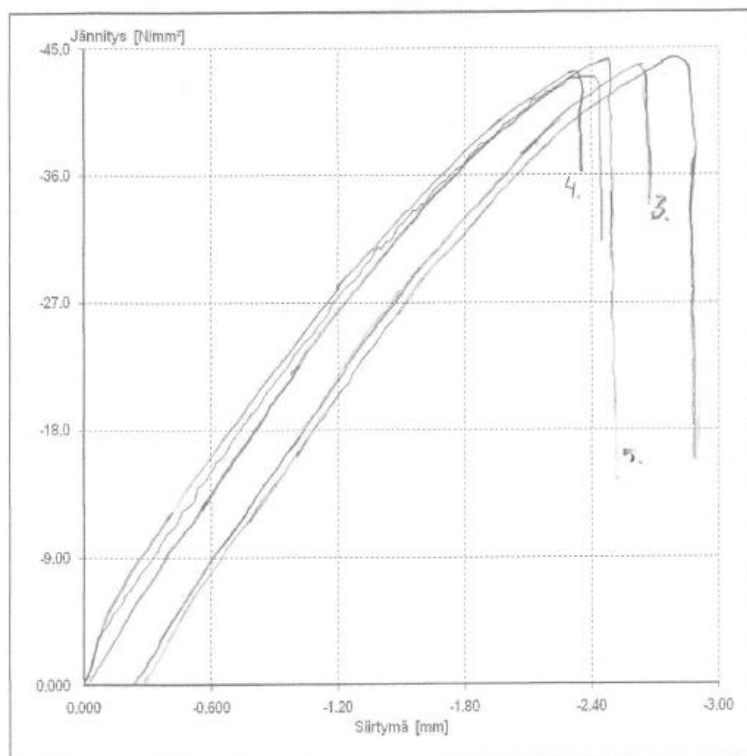
PE/PA+paperi+kytkentäaine B

	taivutusjännitys max (MPa)	taivutus- kimmomoduuli (Mpa)	taipuma (mm)	taivutusvenymä
1	44,97	4042	2,7	0,0151
2	51,67	3920	3,9	0,0127
3	50,23	3920	3,8	0,0209
4	44,95	3920	2,6	0,0145
5	53,41	3920	3,8	0,0209
keskiarvo	49,05	3944	3,3	0,01682
hajonta	3,90	54,6	0,63	0,004

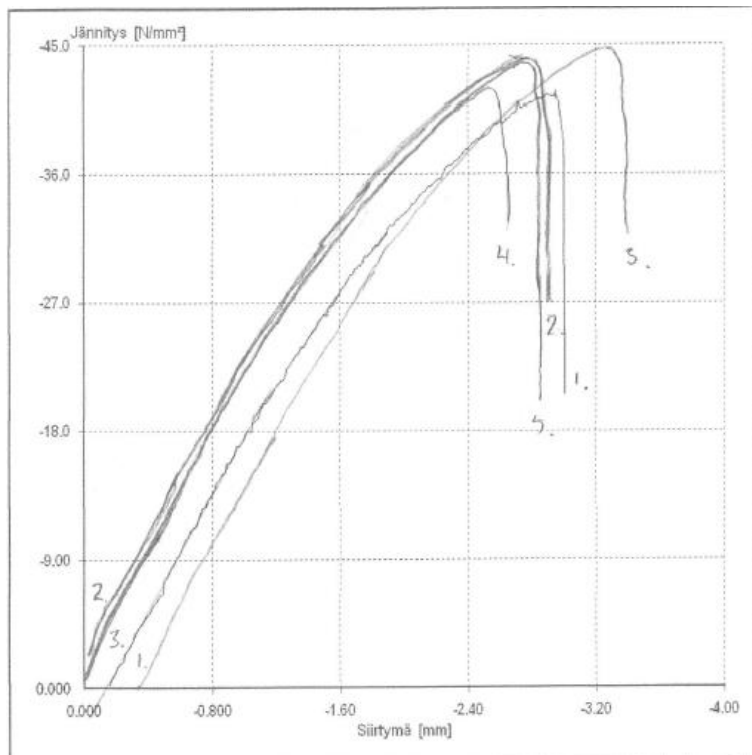
Taivutuskoeikäyrät



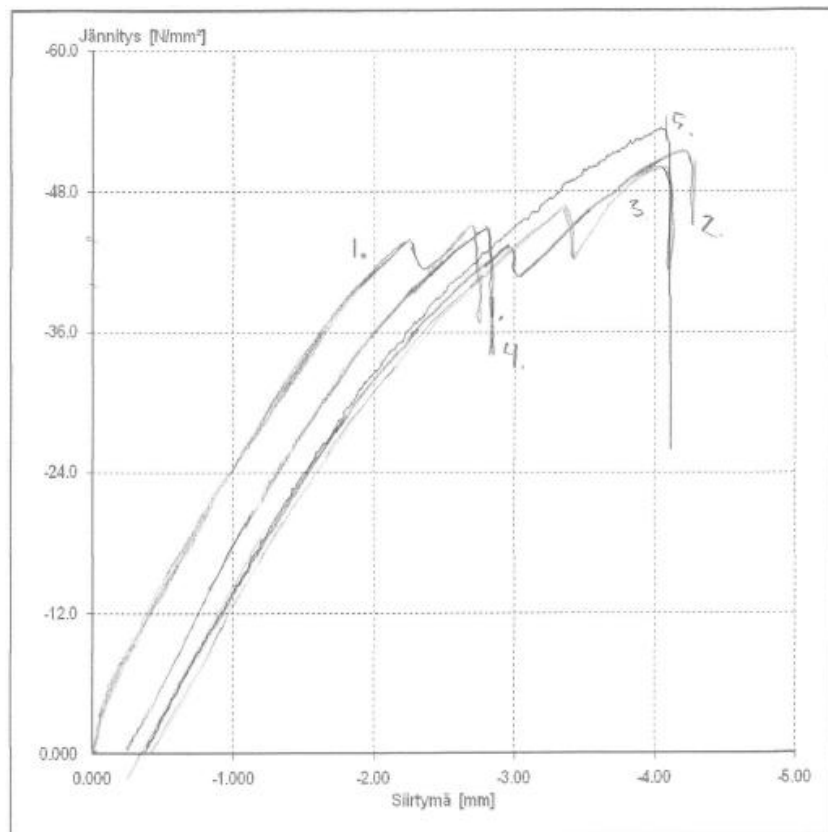
PE/PA



PE/PA+paperi



PE/PA+paperi+kytkentäaine A



PE/PA+paperi+kytkentäaine B